



La voix humaine : vibrations, résonances, interactions pneumo-phono-résonantielles

Nathalie Henrich Bernardoni

► To cite this version:

Nathalie Henrich Bernardoni. La voix humaine : vibrations, résonances, interactions pneumo-phono-résonantielles. Linguistique. Université Grenoble Alpes, 2015. tel-01249158

HAL Id: tel-01249158

<https://hal.science/tel-01249158>

Submitted on 30 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° Identificateur

Année 2015

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

présentée devant

l'Université de Grenoble

La voix humaine :
vibrations, résonances, interactions pneumo-phono-résonantielles

par

Nathalie HENRICH BERNARDONI

Docteur en Acoustique Musicale

Soutenance le Vendredi 4 Décembre 2015 devant la commission d'examen

Composition du jury

Rapporteurs : Dr. Rachid Ridouane LPP, Paris
Pr. Dominique Morsomme Université de Liège, Belgique
Dr. Christophe d'Alessandro LIMS-CNRS, Orsay

Examineurs : Pr. Malte Kob Detmold Hochschule für Musik, Allemagne
Pr. Antoine Giovanni CHU La Timone, Marseille

Mis en page avec la classe thesul.

Remerciements

“Si tu manges le fruit d’un grand arbre, n’oublie pas de remercier le vent.” (Proverbe bariba, Bénin)

Dans ma vie de recherche, j’ai eu la chance de faire de belles rencontres avec toutes ces personnes que j’aimerais remercier ici pour avoir fait un bout de chemin scientifique avec moi, pour les échanges et les nombreux fruits qu’ils ont donné.

Ils sont à l’origine de ma passion pour l’Acoustique Musicale . . . Joe Wolfe, John Smith et John Tann (UNSW, Sydney, Australie) et mon ami Xavier Cointault.

Merci pour les racines de mon arbre.

Ils ont partagé ma passion pour la voix et ils m’ont ouvert les portes de la recherche sur la voix en France . . . Michèle Castellengo (LAM, Paris), Christophe d’Alessandro et Boris Doval (LIMSI, Orsay).

Merci pour le tronc de mon arbre.

Ils ont été mes étudiants en thèse et ils sont à présent mes collègues proches : Maëva Garnier et Lucie Bailly. D’autres étudiants en thèse, comme Sandra Cornaz, Laurent Huguet, Cédrik Erbsen, Noel Hanna, Diane Caussade, Gustavo Andrade Miranda et tous ces stagiaires et orthophonistes en devenir qui rendent mon quotidien joyeux et animé!

Merci pour les branches de mon arbre.

Ils m’ont accueillis à bras ouverts pour un séjour post-doctoral inoubliable en Suède : Sten Ternström, Johan Sundberg, Stellan Hertegard, Svante Granqvist, Mikael Bohman et tous mes collègues du TMH-KTH à Stockholm . . . sans oublier le petit lutin merveilleux qui m’a conduite en Suède, ma chère Gunilla Sundin . . .

Merci pour les branches de mon arbre.

Ces collègues avec qui je partage mon quotidien Alpin de recherche : Nathalie Vallée, Philippe Chaffanjon et tous les membres de l’équipe *Voix, Système Linguistique et Dialectologie*, Christophe Savariaux, Coriandre Vilain, Thomas Hueber, Laurent Girin, Maëva Garnier, Pierre Badin, Gang Feng, Denis Beautemps, Jocelyne Sarfati, Lucie Bailly, Agnès Job . . .

Merci pour les branches de mon arbre.

Ils m’ont accueillis chaleureusement à l’Institut de la Communication Parlée : Pauline Welby, Hélène Loevenbruck, Jean-Luc Schwartz, Xavier Pelorson, Pascal Perrier, Gérard Bailly, Frédéric Elisei, Véronique Aubergé, Albert Rilliard et Solange Rossato . . .

Merci pour les feuilles de mon arbre.

La vie sur GIPSA-lab est belle grâce à tant de personnes qui se dévouent pour le bien de tous. J’ai eu le plaisir d’interagir avec Jean-Marc Thiriet, Denis Beautemps, Marie-Rose Alfara, Akila Mokthari, Cécilia Mendes, Laure Bastide, Marielle di Maria, Nadine Bioud, Elsa Genin, Martine Brossier, Christine Romero, Lucia Bouffard-Tocat, Patricia Reynier, Isabelle Maugis, Christian Bulfone, Anne Fradin, Jean-Marie Rousvoal, Olivier Chabert, Mikaël Urankar, . . . La liste est longue, j’en oublie sûrement. J’ai une pensée pour tous ces collègues que je croise dans mon quotidien et qui apportent chacun à leur façon leur petit rayon de soleil. Je pense aussi à Houria El Mansouri qui m’a beaucoup aidée pour l’organisation de l’école d’été Sciences et Voix

Chantée 2009, à Catherine Fourcin dont le sourire m'accueille toujours avec bienveillance dans son secrétariat lors de mes visites à l'équipe LAM de l'IJLRA, à Philippe Masson sans qui les travaux au Laboratoire d'Anatomie des Alpes Françaises ne pourraient pas être menés.

Merci pour le soleil qui éclaire mon arbre.

Ils sont de très proches collaborateurs, avec qui je partage ma passion de la voix ... sur Marseille et Aix-en-Provence : Antoine Giovanni, Thierry Legou, Alain Ghio, Benoît Amy de la Bretèque, Aude Lagier

sur Paris : Michèle Castellengo, Bernard Roubeau, Robert Expert, Boris Doval, Christophe d'Alessandro, Cédric Gendrot, Yves Ormezzano, Bernard Lortat-Jacob, Claire Pillot, Lise Crevier-Buchman, Coralie Vincent, Gérard Chevaillier, Thomas Hélie

Merci pour la sève qui nourrit mon arbre.

Grâce à des personnes d'exception, de grands chercheurs, de géniaux ingénieurs, des praticiens hors pair, mes recherches se sont également épanouies à l'International ...

Merci à Frank Müller, Markus Hess, Malte Kob (Allemagne) ; Anna Barney (Royaume-Uni) ; Jan Svec (République Tchèque) et Christian Herbst (Autriche) ; Thierry Dutoit, Thomas Drugman et toute l'équipe de Mons (Belgique) ; Peter Murphy (Irlande) ; et bien sûr Joe Wolfe et tout le groupe *Music Acoustics* de la School of Physics à l'UNSW (Australie)

Merci pour la pluie qui abreuve mon arbre.

Merci à tous ces collègues, trop nombreux pour tous les citer ici, avec qui j'ai eu la chance de travailler et d'échanger ...

Merci pour le vent qui caresse mon arbre.

“Fermez les yeux et entendez bruire cette foule humaine dans votre dos. Toute cette humanité dont vous procédez ! Sentez derrière vous cette longue chaîne d'amants et d'amantes dont vous êtes, en cet instant, les seuls maillons visibles ! Ils n'ont pas désespéré du monde et vous en êtes la preuve vivante ! C'est avec cette conscience-là que vous trouverez la force et le courage de vous lancer.”

(Christiane Singer, *N'oubliez pas les chevaux écumants du passé*)

Que serais-je sans ceux qui m'ont donné la vie, le goût des sciences : mes chers parents Jérôme et Jeanine Henrich ?

Merci pour la graine qui a donné vie à mon arbre.

Que serais-je sans ma famille et mes amis, qui m'équilibrent et me ramènent à l'essentiel ? Sans mon grand bonheur, Paul, et mes trois étoiles, Anna, Léo et Lucie ?

Merci pour les arbres et les fleurs qui poussent près de mon arbre.

“Je me suis rendu compte que j’avais de moins en moins de choses à dire, jusqu’au moment où, finalement, je me suis tu. Dans le silence, j’ai découvert la voix de Dieu.”

(Søren Kierkegaard)

A la mémoire du Dr. Jocelyne Sarfati, Septembre 2015.

Sommaire

Dossier Personnel	1
-------------------	---

Curriculum vitae	3
------------------	---

Synthèse des activités d'enseignement

1	Cours Universitaire (Licence, Master, DU)	7
2	Cours à l'Université Ouverte de Lyon	7
3	Académie Européenne de la Voix (European Academy of Voice)	7
4	Ecoles d'été - Summerschools	7
5	Milieu scolaire	8
6	Formation, séminaire	8
7	Ateliers Sciences et Voix	9
8	Divers	9

Synthèse des activités d'encadrement et de recherche

1	Encadrement de Thèses de Doctorat	11
2	Encadrement de Mémoires d'Orthophonie	12
3	Encadrement de Stage (M1, M2, ERASMUS)	12
4	Parcours de recherche	14
4.1	Résumé du parcours de recherche	14
4.2	Axes de recherche	15

1

Introduction générale : production de la voix et théorie source-filtre 21

- 1.1 La production de la voix humaine : entre respiration, phonation et articulation 21
- 1.2 La Théorie Source-Filtre dans le traitement de la Parole 23
 - 1.2.1 L'indépendance source-filtre, une hypothèse majeure 23
- 1.3 Les interactions source-filtre 24
- 1.4 Conclusion 25

2

Méthodes expérimentales pour l'étude de la voix humaine 27

- 2.1 Mesure de la pression sous-glottique 27
- 2.2 Visualisation de la vibration glottique et mesure du contact 28
 - 2.2.1 Cinématographie ultrarapide et transillumination strobophotoglottographique 28
 - 2.2.2 Détection du contour glottique et glottovibrographie 29
 - 2.2.3 Analyse du signal électroglottographique dérivé 31
 - 2.2.4 Reconstruction par imagerie électrique du contact glottique sur l'épaisseur 32
- 2.3 Analyse du signal de source glottique en voix chantée 32
- 2.4 Impédancemétrie aux lèvres pour la mesure des résonances acoustiques du conduit vocal en phonation 34
- 2.5 Suppléance vocale par injection acoustique aux lèvres 36

3

Vibrations laryngées 37

- 3.1 Registres vocaux et mécanismes laryngés 37
 - 3.1.1 La petite histoire des registres vocaux 37
 - 3.1.2 Les mécanismes laryngés chez l'adulte 40
 - 3.1.3 Identification des mécanismes laryngés par électroglottographie 40
- 3.2 Exploration du comportement physiologique laryngé pour diverses expressions vocales 41
 - 3.2.1 La voix mixte 41

3.2.2	La voix chantée de l'enfant pré-pubère	42
3.2.3	La voix de sifflet	43
3.3	Vibration des plis vestibulaires	44
3.3.1	Caractérisation de la vibration vestibulaire dans le chant Sarde du Bassu	44
3.3.2	Implication des plis vestibulaires dans l'effort vocal	45

4

Stratégies d'ajustement résonantiel

4.1	Les résonances dans le chant lyrique	51
4.2	Chant bulgare féminin	53

5

Interactions pneumo-phono-résonantielles

5.1	Etude du contrôle aérodynamique et biomécanique de la fréquence fondamentale, entre pression sous-glottique et tension laryngée	55
5.2	Modélisation aérodynamique de l'interaction entre les plis vocaux et les plis vestibulaires	57
5.3	Impact aérodynamique d'une forte constriction due à une paille en sortie des lèvres : étude sur maquette et sur l'humain	59
5.4	Etude de l'influence de la source sur l'acoustique du conduit vocal	61
5.4.1	Etude sur maquette	61
5.4.2	Etude sur l'humain	62

6

Santé vocal, apprentissage et rééducation

6.1	De l'effort au forçage vocal, ou comment le locuteur s'adapte à une situation de communication perturbée	67
6.2	Le Human Beatbox	69
6.3	Impact sur la voix parlée et chantée d'une chirurgie endocrinienne cervicale	70
6.4	La voix chantée pour améliorer l'apprentissage phonétique du Français Langue Etrangère (FLE)	72
6.5	Rééducation vocale à la paille	73
6.6	Coordination-synchronisation gestes-voix et qualité de voix dans la maladie d'Alzheimer	74

Programme de recherche et perspectives

77

1	Voix et parole : anatomie et physiologie, gestes phonatoires et contrôle articulatoire, coordination pneumo-phono-résonantielle	77
---	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

1.1	Effort et coordination dans la production des consonnes occlusives . .	77
1.2	Description et compréhension des gestes phonatoires dans la production des plosives finales non-relâchées du vietnamien	77
1.3	Modélisation aéro-acoustique et biomécanique de la vibration des plis vocaux dans la production des voyelles	78
2	La voix chantée : physiologie, acoustique musicale, ethnomusicologie, cognition	78
2.1	Pratiques vocales chantées : Human Beatbox, yodel, hōmij, voix mixte	78
2.2	La voix chantée de l'enfant : mécanismes laryngés, ajustements résonantiels	78
2.3	Du geste au chant et chant en chœur : l'interaction entre chef de chœur et choristes	79
3	Troubles de la voix, de la parole et du langage	79
3.1	Voix, gestes, parole et chant dans la maladie d'Alzheimer	79
3.2	Rééducation du bégaiement par la voix chantée : corrélats physiologiques et cognitifs	79
3.3	Rééducation vocale à la paille : principe physiologique et application à l'évaluation de la pression sous-glottique	80
3.4	Elaboration de substituts fibreux d'oscillateurs biologiques, avec application aux plis vocaux	80
3.5	Étude clinique de l'impact de chirurgie endocrinienne cervicale (thyroïdectomie, parathyroïdectomie)	80
3.6	Troubles de la voix chantée : physiologie et rééducation	80

Table des figures

1.1	<i>Représentation de l'instrument vocal humain sur une coupe IRM médiosagittale. D'après Henrich, 2012</i>	22
1.2	<i>Illustration de la théorie source-filtre linéaire</i>	24
2.1	<i>Illustration d'un cycle glottique observé par transillumination strobophotoglyphique. D'après Henrich et al., 2003</i>	29
2.2	<i>Présentation des données de cinématographie ultrarapide sur plusieurs cycles glottiques pour diverses séquences avec variation de la qualité vocale. GVG et dGVG : glottovibrogramme et sa dérivée ; OF-GVG : glottovibrogramme par flux optique. D'après Andrade-Miranda et al., MAVIBA 2015</i>	30
2.3	<i>Dispositifs d'impédancemétrie (d1 : réplique du dispositif australien, d2 : haut-parleur avec cône d'impédance, d3 : chambre de compression avec cône exponentiel, d4 : Talk Box) et banc de test en chambre anéchoïque.</i>	34
3.1	<i>A. Illustration de l'usage du laryngoscope (Garcia, 1884) B. Registres identifiés par Manuel Garcia dans son Mémoire sur la voix humaine (Garcia, 1847)</i>	38
3.2	<i>Visualisation du cycle vibratoire glottique en M1 et en M2 pour un même locuteur. Chaque séquence a une durée de 6.75ms (caméra à 4000 images/s). D'après Henrich, 2012</i>	46
3.3	<i>Glissando ascendant-descendant avec transitions de mécanismes laryngés associées à un changement d'amplitude du contact glottique (EGG) et une variation de quotient ouvert. D'après Henrich, 2001</i>	47
3.4	<i>Exploration du comportement laryngé et de l'intensité vocale pour une série de sons chantés alternativement en registre de poitrine ou en registre de voix mixte par un contre-ténor. Les mécanismes laryngés identifiés sont notés M1/M2.</i>	48
3.5	<i>Positionnement de la production en registre de voix mixte d'un contre-ténor sur son phonétogramme par mécanismes laryngés. La voix mixte de poitrine et la voix mixte de tête distinguées par le chanteur sont respectivement notées mx1 et mx2. D'après Castellengo et al., 2007</i>	49
4.1	<i>Evolution de la fréquence de la première résonance en fonction de la hauteur de la note chantée pour les voyelles /a/-hard et /u/-who'd (valeur moyenne et écart-type pour les 10 chanteuses (altos et sopranos) de la base LYR2004). La ligne diagonale en pointillée indique l'accord [R1 : f0]. La zone grisée représente la valeur de R1 mesurée pour ces chanteuses et ces voyelles en voix parlée (\pm écart-type). D'après Henrich et al., 2011.</i>	52

4.2	<i>Evolution de la fréquence de la première résonance mesurée pour six voyelles du bulgare chantées dans le style traditionnel bulgare - avec deux qualités différentes : “teshka”-lourd et “leka”-léger - et dans le style lyrique - en voix de tête. Les lignes noirs horizontales présentent les valeurs mesurées en voix parlée. Les lignes obliques présentent les rapports harmoniques $R_i = H_n = n f_0$. D’après Henrich, 2014.</i>	54
5.1	<i>Illustration du banc larynx hybride au LADAF. L’adduction des plis vocaux se fait par traction sur des fils de suture insérés au niveau des insertions musculaires des cartilages aryénoïdes. Ces tractions reproduisent l’action de contraction des muscles inter-aryénoïdiens et des muscles crico-aryénoïdiens latéraux. Ils induisent un mouvement d’adduction et d’élongation des plis vocaux. Le contact entre les plis est mesuré par électroglottographie. La pression sous-glottique est mesurée à partir du capteur de pression aérodynamique de la station EVA2.</i>	56
5.2	<i>Description des larynx excisés et de leurs capacités vibratoires (étendue de f_0 en Hz et notation musicale) selon les conditions de contrôle aérodynamique ou de contrôle mécanique. D’après Hanna, 2014.</i>	57
5.3	<i>Evolution de la fréquence fondamentale en fonction de la pression sous-glottique sous condition de contrôle aérodynamique (cercles noirs) ou mécanique (carré gris). Les lignes en pointillé représentent les courbes $f_0 = a\sqrt{P_{sg}}$ avec $a \in [5, 50]$.</i>	58
5.4	<i>Variation de la fréquence fondamentale (A) et de la pression sous-glottique (B) en fonction de la pression d’eau dans la réplique de plis vocaux pour divers diamètres de paille (5, 6.5 et 9.5mm) et pour la condition sans paille (“no straw” - tuyau ouvert).</i>	60
5.5	<i>A. Fonction de transfert théorique pour un conduit de 17.5cm ouvert à une extrémité (lèvres) et d’ouverture variable à l’autre (Wglott). D’après Barney et al., 2005. B. Variation de la fréquence du premier formant F1 mesuré sur la maquette dynamique en fonction des conditions d’amplitude (glottal width) et de durée relative d’ouverture glottique (OQ). D’après Barney et al., 2007.</i>	62
5.6	<i>Fréquences de la première résonance R1 en voix chuchotée et en voix parlée pour des 22 locuteurs de la base LYR2004 et les quatre voyelles.</i>	63
5.7	<i>Evolution moyenne des fréquences des deux premières résonances entre voyelles parlées et voyelles criées selon trois conditions de contrôle (S1 : sans contrôle; S2 : avec contrôle de la hauteur tonale; S3 : avec contrôle de la hauteur tonale et du geste articulatoire). D’après Garnier et al., 2008</i>	65
5.8	<i>A. Evolution du quotient ouvert pour une même note et même voyelle chantée en mécanisme laryngé M1 ou M2. La droite oblique pleine présente l’égalité $OQ_{M2} = OQ_{M1}$, et celle en pointillé $OQ_{M2} = OQ_{M1} + 0.27$. B. Evolution de la fréquence de la première résonance pour une même note et même voyelle chantée en mécanisme laryngé M1 ou M2. La droite oblique pleine présente l’égalité $R1_{M2} = R1_{M1}$, et celle en pointillé $R1_{M2} = R1_{M1} - 65\text{Hz}$. D’après Henrich et al., 2014</i>	66
6.1	<i>Rendement vocal (dans le débit : $R_q = I_{db} - 10 * \log_{10} D_{oral}$) en fonction de l’intensité pour les quatres chanteurs de beatbox et différents modes d’expression (parole, parole projetée, cri, chant, beatbox). D’après Bourdin et Navion, 2013.</i>	70

Dossier Personnel

Curriculum vitae

Nathalie Henrich Bernardoni

Née le 22 Juin 1974 à Strasbourg (France)

Nationalité française, mariée, trois enfants (07/2005, 01/2008, 03/2011)

EMPLOYEUR ET AFFECTATION :

Chargée de Recherche 1ère classe au CNRS

Institut Nationale des Sciences Humaines et Sociales (INSHS)

Section Sciences du Langage (34)

ADRESSE PROFESSIONNELLE :

✉ : GIPSA-lab Département Parole et Cognition
Domaine Universitaire, BP 46
11 rue des Mathématiques
38402 Saint Martin d'Hères cedex

☎ : +33 (0)4 76 57 45 34

ou +33 (0)4 76 82 41 27

📠 : +33 (0)4 76 57 47 10

@ : nathalie.henrich@gipsa-lab.fr

Formation

- Normalienne (ENS Cachan, Dpt. Physique Fondamentale, 1994-1998)
- Licence et Maîtrise de Physique (Université d'Orsay, 1995 et 1996)
- Agrégée de Sciences Physiques (1997)
- Magistère de Physique Fondamentale (ENS Cachan et Université d'Orsay, 1998)
- DEA ATIAM (Aix-Marseille II, 1998)
- Thèse de Doctorat en Acoustique Musicale (Université Paris 6, Nov. 2001)

Compétences et centres d'intérêt

- physiologie et physique de la voix humaine

- traitement de la voix, de la parole et du chant
- phonétique expérimentale et clinique
- vocologie
- voix chantée

Distinction

- Médaille de Bronze 2013 du CNRS

Publications et communications

- **1** ouvrage ; **25** publications scientifiques dans des journaux à comité de lecture ; **7** publications dans des revues sans comité de lecture et des chapitres d'ouvrage ; **43** communications avec actes ; **66** communications sans actes ; **33** cours et conférences grand public.
- **30** Conférences invitées, dont **9** keynote lectures.

Encadrement

- Co-direction de **neuf thèses de doctorat**, dont cinq soutenues : Maëva Garnier, Juin 2007 ; Lucie Bailly, Juin 2009 ; Sandra Cornaz, Déc. 2014 ; Noel Hanna, Déc. 2014 ; Benoît Amy de la Bretèque, Déc. 2014
- Co-direction de **cinq mémoires d'orthophonie** : Isabelle Randi, 2008 ; Vanessa Bourdin et Alexia Navion, 2013 ; Claire Lalevée-Huart, 2013 ; Anne Courbis et Stéphanie Montérymard, 2014 ; Maud Serieux et Fanny Gaubert, 2015
- Encadrement de **stagiaires (M1, M2, ERASMUS)**

Comités et Instances scientifiques

Membre de sociétés savantes et associations en lien avec la voix :

- Société Française d'Acoustique (SFA) • Société Européenne d'Acoustique (EAA) • Société Française de Phoniatrie et des pathologies de la communication (SFP&Co) • Société Française d'Ethnomusicologie (SFE) • Association internationale Collegium Medicorum Theatri (CoMET)
- Association Française des Professeurs de Chant (AFPC) • Association Francophone de la Communication Parlée (AFCP)

Implications :

- Membre élue du bureau du Groupe Spécialisé d'Acoustique Musicale (GSAM) de la SFA 2003-2016 ; Responsable financier 2003-2014
- Membre élue du bureau du Groupe Spécialisé d'Acoustique de la Parole (GAP) de la SFA 2015-2016
- Membre élue du CA de l'AFCP 2015-2016
- Membre nommée du Pôle ALLSHCS de l'Université Grenoble Alpes 2014-2015
- Membre nommée du Comité Scientifique de l'Exposition « La Voix » organisée par Universcience à la Cité des Sciences 2012-2013
- Déléguée remplaçante pour la France du comité de direction de l'action européenne COST 2103 Advanced Voice Function Assessment 2007-2011

Participation à la vie scientifique internationale

- **Editrice Associée** pour la revue Logopedics Phoniatrics Vocology (LPV, groupe Taylor&Francis)
- **Relectrice pour diverses revues scientifiques internationales** : Journal of the Acoustical Society of America ; Acta Acustica united with Acustica ; IEEE Trans. Acoustic, Speech, and Signal Processing ; Speech Communication ; Journal of Speech, Language, and Hearing Research ; Journal of Voice ; Logopedics Phoniatrics Vocology ; EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Human Frontier Science Program Journal, Journal of Interdisciplinary Music Studies, Transactions on Biomedical Engineering
- **Membre de comités scientifiques et organisationnels de conférences nationales et internationales**
 - **permanente** : International Conference on Voice Physiology and Biomechanis ICVPB depuis 2007 ; Pan-European Voice Conference PEVOC depuis 2015
 - **invitée** : International Congress of Acoustics ICA, Espagne, 2007 ; European-American Acoustical Congress Acoustics'08, Paris, 2008 ; International Conference on the Physiology and Acoustics of Singing PAS5, Suède, 2010 ; Pan-European Voice Conference PEVOC, période 2009-2012
- **Organisation de conférences nationales et internationales**
 - **Ecole d'été « Sciences et voix : approche pluridisciplinaire de la voix chantée »**, Giens, Sept. 2009 - <http://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/summerschool/voixchantee/>
 - **Conférence internationale pan-européenne sur la voix PEVOC9**, Marseille, Sept. 2011 - <http://www.pevoc.org/pevoc09/>
 - **Atelier Sciences et Voix** (rencontre mensuelle pour 2012-2015) - <http://atelier-sciences-voix.fr>
- **Référent France pour la Journée Mondiale de la Voix** depuis 2013

Synthèse des activités d'enseignement

1 Cours Universitaire (Licence, Master, DU)

- **2013-2015** : UE Master ISM M1, Faculté de Médecine de Grenoble, UJF, Grenoble. Cours de 2h : "*Anatomie et physiologie laryngée*"
- **2013-2015** : DU Voix et Symptômes, Université Paris 7, Paris. Cours de 3h : "*Entre Respiration, Phonation, Articulation et Résonance : Exploration scientifique de la voix et de son contrôle*"
- **2005 - 2009** : M2 SIPT "*Acoustique et production de la parole*" - 3h/an
- **2002 - 2004** : TPs Etude Approfondie (EA) d'Acoustique de l'Ecole Polytechnique (X) - 24h/an
- **1998-2001** : Monitorat à l'Université Paris 6. TDs de Mécanique du Solide - DEUG 2ième année (MIAS22) - 64h/an

2 Cours à l'Université Ouverte de Lyon

- **2010-2011** : Cycle « Perception et Transcription du Son Musical », cours de 2h
- **2008-2009** : Cycle Arts, Sciences et Société « Bruits et musique », cours de 2h
- **2006-2007** : Cycle Sciences et Techniques « Histoire des sons », cours de 2h
- **2005-2006** : Cycle 32, Niveau Général, « De l'émission à la perception des sons », cours de 2h

3 Académie Européenne de la Voix (European Academy of Voice)

- **2015** : cours de 30mn "*Voice aerodynamics*" (N. Henrich) pour la troisième édition de l'European Academy of Voice
- **2013** : cours de 30mn "*Aerodynamics and voice source*" (N. Henrich) pour la seconde édition de l'European Academy of Voice
- **2011** : cours de 4*1h "*Breathing, pulmonary function and aerodynamics*" (J. Sunberg, N. Henrich) pour la première édition de l'European Academy of Voice

4 Ecoles d'été - Summerschools

- **2012** : International Summer School on Voice Assessment, Erlangen, Allemagne. Cours de 4h sur "*Glottal contact and vocal tract resonances in phonation : measurements and analysis*".

- **2010** : COST Workshops Erlangen, Allemagne. Cours de 1h sur "*Singing Voice Assessment by means of electroglottography and impedance measurement*".
- **2010** : EAA Summerschool, Ljubljana, Slovénie. Cours de 1h30 sur "*Voice Analysis Methods*" (N. Henrich, M. Kob)
cours de 2h sur "*Singing Voice Assessment Workshop : Electroglottography and Impedance Measurement Techniques*" (N.Henrich).
- **2009** : Ecole Thématique CNRS "Sciences et Voix : approche pluri-disciplinaire de la voix chantée", Presqu'île de Giens Sept. 2009 - organisation de l'école, TP Electroglottographie (2h)
- **2008** : Ecole Thématique CNRS "Imagerie médicale pour l'étude de la parole", Porquerolles. Cours de 1h sur *La cinématographie ultra-rapide : Application à la caractérisation des signaux électroglottographiques et l'étude physiologique des structures vibratoires laryngées*.
- **2006** : Ecole Thématique CNRS "Voix, parole, langues", Cargèse. Cours de 1h sur *Physiologie de la voix et paramètres de la phonation*.

5 Milieu scolaire

Enseignement d'1h ou 2h sur le thème "*La voix, ta voix*" à l'attention d'élèves du secondaire, principalement niveau collège.

- **Avr. 2015** : Collège de Boigne, La-Motte-Servolex [4 interventions d'1h]
- **Mars 2015** : Collège Marcel Bouvier, Les Abrets [1h]
- **Janv. 2014** : Collège de Boigne, La-Motte-Servolex [1h]
- **Déc. 2013** : Collège Saint Exupéry, Bourg-St-Maurice [2h]

6 Formation, séminaire

Formation pour le PREAC Voix et Chant Choral de l'Académie de Grenoble

Le Centre régional de documentation pédagogique (CRDP) de l'Académie de Grenoble, en étroite collaboration avec la Délégation Académique à l'Action Culturelle (DAAC) et la Direction régionale des affaires culturelles (DRAC), anime un pôle de ressources pour l'activité artistique et culturelle (PREAC) sur le thème "*Voix et chant choral*". Dans ce cadre, un stage de formation de formateur est organisé par le PREAC chaque année à l'attention des enseignants de musique du secondaire. Il est généralement intégré au festival annuel "Les voix du Prieuré" au Bourget-du-lac.

Interventions dans ce cadre :

- **2015** : *Ecouter la voix*, Le-Bourget-du-lac
- **2014** : *La voix de l'enfant et la mue*, Collège de Jarrie
- **2013** : *Exploration scientifique de la pratique vocale du Human Beatbox et Outils d'analyse et de synthèse de la voix*, Le-Bourget-du-lac
- **2012** : *Du geste au son : l'instrument musical humain*, Le-Bourget-du-lac

Autres interventions pour l'Académie de Grenoble

- **2014-2015** : stage "*Acoustique Musicale*" organisée par la DAAC
Cours de 1h sur *la voix dans les salles* à La Grange aux lacs, Evian-les-bains.

Cours de 1h sur *la voix* à la MC2, Grenoble.

Ateliers de 3h co-animés avec C. Vilain sur l'acoustique musicale à GIPSA-lab, Grenoble.

- **2014** : formation "*Bruit et Voix* des membres des CHSCT de l'Académie de Grenoble. Intervention de 3h co-animée avec M. Garnier, Lycée Guyemer, Grenoble.

7 Ateliers Sciences et Voix

Les Ateliers Sciences et Voix ont été initiés en 2012, avec le soutien de la Région Rhône-Alpes et celui de la Société Française d'Acoustique. Ils consistent en des rencontres mensuelles sur une matinée ou une après-midi autour d'un thème scientifique en lien avec la voix, animé par une personnalité du milieu académique ou médical. Ils sont rediffusés en live et podcastés sur le site <http://atelier-sciences-voix.fr>.

Mes interventions dans ce cadre :

- *Stratégies d'ajustement résonantiel en voix chantée*, ASV1.3 Déc. 2012.
- *Morbidité vocale de la chirurgie endocrinienne cervicale : cas de la thyroïdectomie et parathyroïdectomie*, ASV2.4 Janv. 2014
avec Guigard S., Lalevée C., Chaffanjon P., Sarfati J., Savariaux C.

8 Divers

- **Journée de formation au chant diphonique**, stage dirigé en 2013 par Bayarbaatar Davaasuren et organisé par l'Association Orféo à Grenoble. Intervention sur l'*Usage de la voix dans le chant diphonique*.
- **Séminaire au Collège de France** *Les mystères de la voix chantée, entre art et sciences*, dans le cadre des cours "*La voix : sa production, sa perception*", Déc. 2012, Paris
- **Formation ORL du 94** co-animé avec B. Doval sur le thème *Voyage scientifique au coeur du Bel Canto*, Dec. 2011, Paris
- **Cours international** *Int. Phoniatrics and Logopaedic Course "The Artistic Voice"* à Ravenne en Italie. Cours sur *The singing voice registers : physiology, acoustics, and perceptual exploration* en Oct. 2007 - 1h.
- **classe d'Acoustique Musicale du CNSMDP, 2005**. Cours d' *Acoustique de la voix* à la classe d'Acoustique Musicale - 6h.

Synthèse des activités d'encadrement et de recherche

1 Encadrement de Thèses de Doctorat

Thèses soutenues

1. **Benoît AMY DE LA BRETEQUE, 2010-2014** : *L'aérodynamique de la voix, à propos des exercices de rééducation avec constriction du tractus vocal*. Co-direction avec Antoine Giovanni (CHU La Timone Marseille et LPL Aix-en-Provence). Thèse soutenue le 18 Décembre 2014.

Benoît Amy de la Bretèque est médecin phoniatre à Montpellier et Marseille.

2. **Noel HANNA, 2011-2014** : *Investigations of the acoustics of the vocal tract and vocal folds in vivo, ex vivo and in vitro*. Thèse en co-tutelle Université de Grenoble - University of New South Wales, Sydney, Australie. Co-direction avec Joe Wolfe, John Smith pour UNSW. Thèse soutenue le 17 Décembre 2014.

Noel Hanna est professeur de physique et chercheur associé à l'UNSW.

3. **Sandra CORNAZ, 2008-2014** : *L'apport de la voix chantée pour l'intégration phonético-phonologique d'une langue étrangère : application auprès d'italophones apprenants de FLE*. Thèse en co-tutelle Université de Grenoble - Université de Turin, Italie. Co-direction avec Nathalie Vallée (GIPSA-lab, Grenoble) et Antonio Romano (Turin, Italie). Thèse soutenue le 12 Décembre 2014.

Sandra Cornaz est enseignante de FLE.

4. **Lucie BAILLY, 2005-2009** : *Interaction entre cordes vocales et bandes vestibulaires en phonation : exploration in-vivo, modélisation physique, validation in-vitro*. Co-direction avec Xavier Pelorson (GIPSA-lab, Grenoble) et Joël Gilbert (LAUM, Le Mans).

Lucie Bailly est chercheure au CNRS depuis Oct. 2010.

5. **Maëva Garnier, 2003-2007** : *Communiquer en environnement bruyant : de l'adaptation jusqu'au forçage vocal*. Co-direction avec Danièle Dubois et Jean-Dominique Polack (LAM, Paris).

Maëva Garnier est chercheure au CNRS depuis Oct. 2011.

Thèses non soutenues

1. **Laurent HUGUET, 2008-2012** : *Caractérisation de phénomènes d'interaction source-filtre en voix parlée et chantée*. Co-direction avec Xavier Pelorson (GIPSA-lab, Grenoble). Laurent Huguet est professeur agrégé de Génie Electrique, en poste depuis 2012.
2. **Cédrik ERBSEN, 2010 - 2014** : *Méthode d'injection d'une source acoustique dans un conduit. Application à la mesure d'impédance et à la suppléance vocale*. Co-direction avec Boris Doval (IJLRA, Paris). Cédrik Erbsen est ingénieur calibration acoustique et instrumentation chez Apple depuis Nov. 2014.

Thèses en cours

1. **Thibaut COCHEREAU, 2015-2018** : *Propriétés dynamiques de biomatériaux mous fibreux pour la conception d'oscillateurs biométriques application tissu vocal*. Co-direction avec Lucie Bailly (3SR, Grenoble).
2. **Diane CAUSSADE, 2013-2016** : *Coordination/synchronisation gestes-voix dans la démence de type Alzheimer (DTA) : évolution dans la parole et dans le chant*. Co-direction avec Nathalie Vallée (GIPSA-lab, Grenoble) et Jean-Marc Colletta (LIDILEM, Grenoble).

2 Encadrement de Mémoires d'Orthophonie

1. **Fanny GAUBERT/Maud SERIEUX, 2014-2015** : *Etude de la voix, de la parole et de l'exécution conjointe de gestes manuels chez des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer*. Coll. avec Diane Caussade, Nathalie Vallée
2. **Anne COURBIS/Stéphanie MONTERYMARD, 2013-2014** : *La voix de l'enfant prépubère de 8 à 10 ans : étendue vocale et mécanismes laryngés*. Co-direction avec Jocelyne Sarfati
3. **Claire LALEVEE-HUART, 2012-2013** : *Impact de la thyroïdectomie sur la voix chantée et parlée : évaluation et rééducation*. Coll. avec Jocelyne Sarfati, Sébastien Guigard, Christophe Savariaux, Anne Leymarie
4. **Vanessa BOURDIN/Alexia NAVION, 2012-2013** : *Etude du forçage vocal au sein d'une population de chanteurs de Human Beatbox*. Coll. Maëva Garnier, Claire Gentil, Christophe Savariaux
5. **Isabelle RANDI, 2007-2008** : *La source vocale : pression sous-glottique et dynamique glottique*. Co-direction avec Benoît Amy de la Bretèque, Université de la Méditerranée - Faculté de Médecine de Marseille

3 Encadrement de Stage (M1, M2, ERASMUS)

1. **Myriam FANTONE, 2015** : *Dynamique Laryngée en lien avec l'effort vocal dans la production des consonnes occlusives*. M1 ISM, UJF, Grenoble. Co-direction Maëva Garnier.

2. **Annalisa PARONI, 2013-2014** : *How do beatboxers play with their tongue and lips ? An ultrasound and high-speed imaging exploration*. Séjour ERASMUS. Codirection Thomas Hueber. Directeur de thèse en Italie Claudio Zmarich.
3. **Diane CAUSSADE, 2013** : *Mise en place et évaluation d'un protocole expérimental en voix parlée et chantée pour l'étude de la coordination/synchronisation gestes-voix dans la démence de type Alzheimer*. M2R U3 UFR LLASIC SFFLE, co-direction Nathalie Vallée (GIPSA-lab, Grenoble) et Jean-Marc Colletta (LIDILEM, Grenoble)
4. **Agnès LE DAUPHIN, 2013** : *Développement d'un outil de mesure des résonances acoustiques du conduit vocal*. Stage 2A PHELMA Filière SICOM B
5. **Sébastien GUIGARD, 2012** : *Etude de la morbidité vocale après chirurgie endocrinienne cervicale (thyroïdectomie, parathyroïdectomie, curages ganglionnaires)*, M2 MITI Université Joseph Fourier.
6. **Sevasti-Zoi KARAKOZOGLOU, 2010** : *Analyse de la source glottique : une étude combinatoire par vidéoendoscopie ultra-rapide et électroglottographie*, stage de Master M2 Recherche Informatique, Université Paris-Sud, Université de Crète. Co-direction avec Christophe d'Alessandro et Yannis Stylianou
7. **Cédrik ERBSEN, 2010** : *Estimation de source par analyse-par-la-synthèse in vivo*, stage de Master M2 ATIAM, Université Paris 6. Co-direction avec Boris Doval, IJLRA
8. **Sandra CORNAZ, 2008** : *La voix chantée, un outil pour l'amélioration de la correction phonétique en FLE ?*, stage de Master M2 recherche Français Langue Etrangère, Université Stendhal. Co-direction Nathalie Vallée, GIPSA-lab, Grenoble.
9. **Abdelkader BOUHADDANE, 2007** : *Exploration de la validité des méthodes de détection formantique à partir d'une mesure physique des résonances du conduit vocal*, stage de Master M2 Acoustique Ultrasons, Université Joseph Fourier Grenoble 1.
10. **Sylvain LAMESCH, 2006** : *Caractérisation de la voix mixte en termes de mécanismes laryngés*, stage de Master M2 ATIAM, Université Paris 6. Co-direction avec Michèle Castellengo, LAM, Paris.
11. **Nelly JULIO, 2004** : *Etude articulatoire par IRM de la voix chantée*, stage de Maîtrise SCL IDL, Université Stendhal. Co-direction avec Pierre Badin, ICP, Grenoble.
12. **David SOTIROPOULOS, 2004** : *Analyse acoustique et catégorisation d'un ensemble de qualités vocales pertinent pour la description de voix lyriques masculines*, stage de DEA ATIAM, Université Paris 6. Co-direction avec Maëva Garnier et Michèle Castellengo, LAM, Paris.
13. **Maëva GARNIER, 2003** : *Approche de la qualité vocale dans le chant lyrique : Perception, verbalisation et corrélats acoustiques*, stage de DEA ATIAM, Université Paris 6. Co-direction avec Michèle Castellengo, Danièle Dubois, Jacques Poitevineau, LAM, Paris.
14. **Robert EXPERT, 2003** : *Les voix d'alto : Essai de catégorisation des voix d'alto par les mécanismes laryngés*, Mémoire pour le prix d'acoustique musicale au CNSM de Paris. Co-direction avec Michèle Castellengo, LAM, Paris.
15. **Gunilla SUNDIN, 2001** : *Synthèse de la voix chantée pour la détermination des seuils de perception des paramètres de source glottique*, stage de DEA ATIAM, Université Paris 6. Co-direction avec Michèle Castellengo, LAM, Paris.
16. **Bertrand CHUBERRE, 2000** : *Les registres et passages dans la voix chantée*, Mémoire pour le prix d'acoustique musicale au CNSM de Paris. Co-direction avec Michèle Castellengo, LAM, Paris.

4 Parcours de recherche

4.1 Résumé du parcours de recherche

Depuis mes **travaux de doctorat soutenus en 2001** et mon **intégration au CNRS en 2002**, je me suis attachée à **explorer la voix humaine à travers une approche pluridisciplinaire : physique, phonétique acoustique et clinique, physiologie laryngée, analyse-synthèse et modélisation.**

Je me suis intéressée à **la voix comme outil de communication**, m'attachant à comprendre comment **analyser, modéliser et synthétiser la qualité vocale**. En collaboration avec Boris Doval et Christophe d'Alessandro (LIMSI, Orsay), j'ai étudié les **propriétés de la source glottique à partir d'un formalisme unifié des modèles d'onde de débit glottique** (Henrich et al., J. Voice 2003 ; Doval et al., Acta Acustica 2006). Ces travaux soulignent les **limites du modèle linéaire source-filtre** [approche théorique développée par Fant (1960) et qui prévaut encore aujourd'hui en analyse-synthèse de la parole] pour appréhender les variations de qualité vocale en voix parlée et chantée. En collaboration avec Anna Barney (ISVR, University of Southampton, UK), j'ai alors mis en évidence l'**impact de la source glottique sur le comportement acoustique du conduit vocal** (Barney et al., Acta Acustica 2007). Pour m'extraire des hypothèses théoriques fortes imposées par la théorie linéaire source-filtre et qui s'appliquent à toutes les techniques existantes d'estimation formantique et de filtrage inverse, j'ai développé des **méthodes expérimentales non-invasives** pour mesurer les caractéristiques de la source glottique et celles du conduit vocal (Henrich et al., JASA 2004 ; Henrich et al., JASA 2005 ; Henrich et al., LPV 2007 ; Garnier et al., JASA 2010 ; Henrich et al., JASA 2011 ; Garnier et al., JASA 2012). En collaboration avec Michèle Castellengo, Boris Doval et Christophe d'Alessandro, j'ai démontré les possibilités de l'**électroglottographie, une technique non-invasive de mesure du contact glottique** maintenant très répandue dans la communauté française des phonéticiens. En particulier, j'ai montré l'intérêt d'**utiliser la dérivée des signaux électroglottographiques pour la détection des instants d'ouverture et fermeture glottique et la mesure du quotient ouvert**. Pour caractériser le comportement formantique du conduit vocal indépendamment de la théorie source-filtre, j'ai initié une collaboration avec l'équipe australienne du Pr. Joe Wolfe (UNSW, Sydney) pour **développer et améliorer des outils de mesure physique en phonation des fréquences de résonance du conduit vocal** (fréquences des formants). Grâce à ces outils, j'ai étudié les ajustements résonantiels dans le chant lyrique, dans le chant Bulgare féminin et dans la parole crieée. Ces études ont montré comment **les locuteurs et chanteurs adaptent l'acoustique de leur conduit vocal aux exigences de communication** (notes chantées dans le cas d'une expression musicale, message verbal à transmettre à un interlocuteur dans le cas de la parole).

Nous faisons tous usage de notre voix au quotidien, et **la question de santé vocale est donc essentielle à notre qualité de vie**. La voix est même un outil de travail pour un tiers des actifs. Les problèmes de surmenage vocal, de forçage, de perte de voix sont reconnus comme un problème global de santé public (rapport INSERM, 2007). Je me suis donc intéressée de près aux questions d'**effort et de forçage vocal**, à travers l'encadrement des travaux de thèse de Maëva Garnier sur l'adaptation du locuteur à une situation de communication dans le bruit (Garnier et al., Perturbations et Reajustements 2007 ; Garnier et al., JSLHR 2010), et ceux de Lucie Bailly sur les plis vestibulaires (Bailly et al., JASA 2008 ; Bailly et al., JASA 2010). Ces deux doctorantes ont été recrutées par la suite au CNRS (Bailly en 2010, Section 10 ; Garnier en 2011, Section 34). Ces travaux ont démontré l'**influence du contexte communicationnel**

dans l'étude de la parole Lombard (adaptation de la parole dans le bruit). Ils ont également mis en évidence le **rôle des plis vestibulaires dans tout geste d'effort vocal**, et modélisé l'impact d'une constriction supraglottique (induite par un rapprochement vestibulaire) sur le mouvement vibratoire glottique. Les plis vestibulaires ne sont donc pas une structure laryngée sans importance : ils peuvent aider ou empêcher le mouvement vibratoire des plis vocaux selon le degré et la longueur de la constriction vestibulaire.

La voix est également l'**instrument de musique** qui nous est offert à la naissance. Mes recherches entre phonétique acoustique, physiologie et acoustique musicale ont permis de **caractériser la voix chantée dans divers styles d'expression** : chant lyrique occidental (Henrich et al., JASA 2005 ; Garnier et al., JASA 2010 ; Henrich et al., JASA 2011 ; Garnier et al., JASA 2012 ; Henrich La voix parlée et la voix chantée 2012), chant féminin Bulgare (Henrich et al., LPV 2006), chant polyphonique Sarde (Bailly et al., JASA 2010). J'ai contribué à clarifier la notion de registre en voix chantée par la formalisation des mécanismes laryngés (Henrich, LPV, 2006 ; Roubeau et al., J Voice 2009 ; Kob et al., Current Bioinformatics 2011, Henrich et Roubeau, Médecine des Arts 2011). Je me suis également intéressée à **la façon dont on perçoit et verbalise la qualité vocale dans le cadre du chant savant occidental de l'adulte** (Garnier et al., J. Interdisciplinary Music Studies 2007 ; Henrich et al. JIMS 2008). Grâce au travail d'un groupe de recherche sur la qualité vocale que j'ai animé pendant plusieurs années, une **grille visuelle et sonore** a été élaborée et proposée aux professionnels de la voix pour caractériser la voix perçue dans le cadre du chant savant occidental de l'adulte.

4.2 Axes de recherche

Mes recherches scientifiques portent sur un **objet d'étude pluri-disciplinaire : la voix humaine**. Elles l'abordent en combinant différentes approches disciplinaires : phonétique expérimentale et clinique, vocologie, physiologie de l'instrument vocal humain, physique des interactions fluide-structure-acoustique au sein du conduit vocal, traitement du signal de parole ou de chant, analyse de la voix et synthèse, ethnomusicologie. Elles s'articulent autour de plusieurs thématiques : 1. **le développement d'outils et de technologies** pour la mesure physique, l'analyse et la synthèse vocale ; 2. **l'observation et la description** du comportement vocal dans la parole et dans le chant ; 3. **la modélisation** de la production vocale humaine du point de vue de la physique et du point de vue du signal ; 4. **l'étude des usages de la voix chantée** pour l'apprentissage, le bien-être, la rééducation et la santé vocale.

Mes différents projets de recherche s'articulent dans ces axes de la façon suivante.

1. Voix et Technologie

Amélioration d'outils existants et conception de nouveaux outils pour la mesure, l'analyse et la synthèse de la voix

- Endoscopie laryngée, cinématographie ultra-rapide, détection automatique du contour glottique, glottovibrographie
- Imagerie électrique du larynx par électroglottographie et tomographie par impédance électrique
- Impédancemétrie du conduit vocal en phonation
- Mesure directe de la pression sous-glottique en phonation et estimation par la mesure de la pression intra-orale

- Analyse-synthèse de la voix chantée
- Evaluation vocale assistée
- Suppléance vocale par injection acoustique aux lèvres

2. Voix, Parole et Chant : expressions et usages

Caractérisation du comportement vocal dans ses diverses formes d'expressions parlées et chantées, en lien avec la pratique artistique ou la santé

- la voix chantée dans les styles et cultures à travers le monde :
 - **chant savant occidental de l'adulte** : production, perception, verbalisation
 - **musiques actuelles amplifiées** : jazz, pop, rock, comédie musicale, Human Beat-box
 - **chant traditionnel** : chant Sarde, chant Bulgare, Yodel
- Ajustement des résonances acoustiques dans le chant lyrique, dans le chant Bulgare féminin
- La voix de sifflet : mécanisme laryngé et ajustement résonantiel
- La voix chantée de l'enfant pré-pubère : registres et mécanismes
- Les plis vestibulaires dans l'effort vocal
- Impact d'une chirurgie endocrinienne cervicale sur la voix parlée et chantée
- Coordination-synchronisation gestes-voix et qualité de voix dans la maladie d'Alzheimer

3. Voix et Modélisation

Etude des interactions source-filtre et des adaptations pneumo-phono-résonantielles. Modèles aéroacoustiques et biomécaniques pour les interactions fluide-structure-acoustique au niveau laryngé.

- Effet d'une charge acoustique sur la source glottique à partir de modèles physiques
- Effet d'une constriction supraglottique (plis vestibulaires) ou en sortie de lèvres (paille) sur le comportement aérodynamique laryngé
- Modélisation aérodynamique de l'interaction entre plis vocaux et plis vestibulaires
- Influence de la source sur l'acoustique du conduit vocal
- Etude du contrôle aérodynamique et biomécanique de la fréquence fondamentale, entre pression sous-glottique et tension laryngée

4. Voix et Usages en apprentissage et rééducation

- Des exercices en voix chantée comme outil pour faciliter l'apprentissage phonétique du FLE (Français Langue Etrangère)
- Rééducation vocale à la paille

Dans le dossier suivant, nous allons préciser le contenu scientifique de ces recherches sur la voix humaine. Nous prendrons comme fil conducteur la théorie source-filtre de la production vocale humaine. Nous nous intéresserons aux vibrations laryngées d'un côté, aux stratégies résonantielles et articulatoires de l'autre. Puis nous explorerons les phénomènes d'interaction pneumo-phono-résonantielle dans la parole et dans le chant. Nous aborderons finalement la question de la santé vocale, de la prévention à la rééducation des troubles de la voix, et l'usage

de la voix chantée dans l'apprentissage d'une langue étrangère.

Nous proposerons ensuite des perspectives de recherche pour les années à venir ... car la voix humaine n'a pas fini de nous en raconter !

Dossier Recherche

Introduction générale : production de la voix et théorie source-filtre

L'humain combine des gestes respiratoires, des gestes phonatoires et des gestes articulatoires pour produire des sons qui lui permettront de s'exprimer et de communiquer avec son environnement. Depuis près d'un demi-siècle, la voix humaine est modélisée par la théorie source-filtre, qui a fait ses preuves dans des domaines aussi divers que le traitement de la parole, l'analyse-synthèse de la voix et la reconnaissance vocale. Cette théorie montre néanmoins ses limites quand l'attention est portée sur la qualité vocale, le naturel dans la synthèse, le forçage vocal, la dysphonie et le développement de troubles de la voix d'origine fonctionnelle. Dans ce chapitre introductif, nous allons décrire brièvement le principe de production de la voix humaine, puis nous poserons le cadre théorique de la théorie source-filtre et nous discuterons de ses possibilités mais également de ses limites.

1.1 La production de la voix humaine : entre respiration, phonation et articulation

Comme illustrée sur la Figure 1.1, la voix est produite par l'instrument vocal humain, au sein duquel se distinguent trois niveaux :

1. **le niveau sous-glottique**, siège de la respiration, qui fournit l'énergie aérodynamique au système. Ce niveau comprend les deux coupes diaphragmatiques, les poumons, les bronches, la trachée et la partie laryngée située sous les plis vocaux
2. **le niveau glottique**, siège de la phonation, où l'énergie aérodynamique se transforme en énergie acoustique par interaction fluide-structure entre l'air et les parois mobiles du larynx (plis vocaux, plis vestibulaires)
3. **le niveau supra-glottique**, dans lequel les ondes acoustiques se propagent et sont rayonnées vers le milieu extérieur. Ce niveau est le siège des gestes articulatoires. Il comprend les cavités laryngées supra-glottiques, pharyngées, orales et nasales. Des sources aéroacoustiques peuvent également être générées au niveau supraglottique (bruits de friction, bruits de plosion) par interaction fluide-structure au niveau de lieux de constriction (velum, palais dur, dents, lèvres)

Pour contrôler sa production de voix, le locuteur ou le chanteur peut agir à divers niveaux.

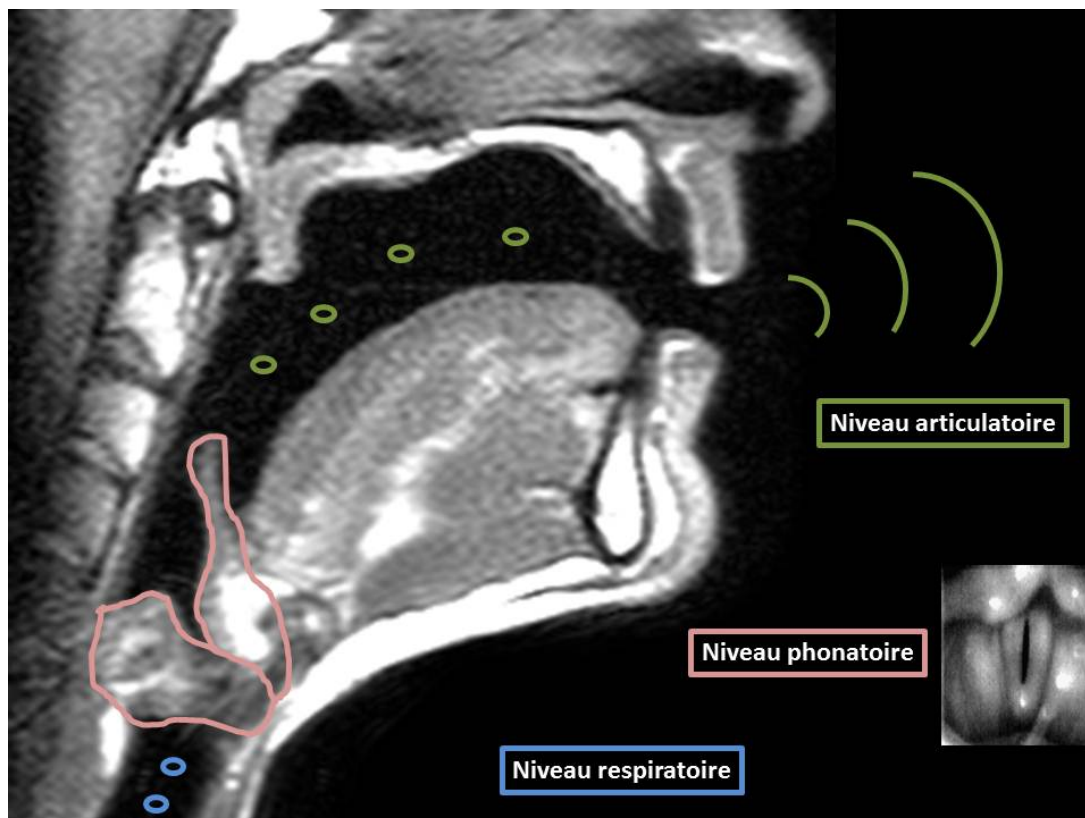


FIGURE 1.1 – Représentation de l'instrument vocal humain sur une coupe IRM médiosagittale. D'après Henrich, 2012

Au niveau sous-glottique, le locuteur peut agir sur la pression et le débit d'air fournis en entrée du système. Il gère ainsi les phases inspiratoires et expiratoires à travers la contraction des muscles abdominaux et costaux liés à la respiration.

Au niveau glottique, le locuteur peut agir sur le degré de constriction à la glotte (ouverture, fermeture partielle, fermeture complète). En cas d'accolement des plis vocaux, il peut contrôler la tension et la raideur des plis par des actions de contraction et par élancement sous les actions synergiques ou antagonistes des muscles intrinsèques du larynx.

Au niveau supraglottique, le locuteur peut susciter des constrictions dans le conduit vocal, directement à proximité du plan glottique (cas d'une constriction vestibulaire), ou en tout point du conduit vocal où la langue peut se rapprocher ou rentrer en contact avec des structures environnantes. Le locuteur contrôle les mouvements de la langue, principal articulateur, l'abaissement ou l'élévation du larynx (organe en suspension), la participation ou non des cavités nasales par abaissement ou élancement du velum (voile du palais, ou palais mou), les mouvements de la mâchoire et des lèvres. Ces contrôles articulatoires impactent directement la réponse acoustique du conduit vocal, à travers les fréquences et les largeurs de bande des résonances de ces cavités.

En quoi le contrôle de l'instrument vocal humain est-il essentiel ?

Ces différents niveaux de contrôle de sa voix permettent au locuteur ou au chanteur de s'exprimer et de communiquer. Le locuteur va pouvoir jouer sur le contenu prosodique de son expression parlée, accentuer son propos, choisir une qualité de voix appropriée au contexte et

aux conditions de communication, et ainsi exprimer par sa voix des ressentis, des émotions. Le chanteur va pouvoir exprimer son potentiel artistique vocal, chanter des mélodies et les nuancer, choisir des couleurs sonores adaptées à la transmission de l'expression artistique.

Le contrôle global de l'instrument vocal humain requiert de trouver un équilibre entre les différentes forces en présence : les forces aérodynamiques, les forces acoustiques, les forces biomécaniques, les forces musculaires et les contraintes anatomiques. Dans le milieu médical et dans le milieu artistique, cet équilibre porte le nom d'accord pneumo-phono-résonantiel¹ (APPR), notion décrite dès 1961 dans l'ouvrage des phoniatries Tarneaud et Borel-Maisonny. La recherche de cet APPR est au coeur de la pédagogie vocale et des pratiques cliniques de rééducation vocale. Des aspects sous-jacents de l'APPR sont également mis en avant, comme la coordination pneumo-phonique et la coordination phono-résonantielle (Ormezzano, 2000). Utiliser sa voix de façon efficace ou acquérir une bonne technique de chant revient souvent à développer les capacités du locuteur ou du chanteur pour obtenir cet APPR.

Comment cette notion d'APPR est-elle prise en compte dans les théories actuelles de production de la voix ?

1.2 La Théorie Source-Filtre dans le traitement de la Parole

La théorie qui prévaut actuellement pour modéliser la production de la voix humaine est la théorie source-filtre développée par Fant en 1960 et illustrée sur la Figure 1.2.

Dans le cas de la production de sons voisés, une source acoustique est générée par modulation du débit d'air à la glotte, la source glottique ou onde de débit glottique (Henrich, 2001). Elle se propage dans le conduit vocal, résonateur dont les fréquences et les largeurs de bandes dépendent de la configuration articulaire. Du point de vue du signal, le conduit vocal se modélise par un filtre auto-régressif tout-pôle, dont les maxima spectraux sont appelés formants. Le signal acoustique est ensuite dérivé aux lèvres, le rayonnement aux lèvres équivalant à la transformation d'une onde de débit acoustique en une onde de pression acoustique. Le signal vocal se propage ensuite dans le milieu extérieur. Cette théorie source-filtre de la production vocale humaine a eu un impact considérable dans le domaine du traitement de la parole, car elle a été appuyée expérimentalement (Fujimura & Lindqvist, 1971) et appliquée avec succès pour l'analyse de la parole (analyse cepstrale, Noll, 1964), le codage par prédiction linéaire (Makhoul, 1975 ; Markel & Gray, 1976), et la synthèse (synthèse par formants, Klatt, 1980 ; Rodet, 1984, synthèse à partir du texte, Dutoit, 1997 ; d'Alessandro et Tzoukermann, 2001). Cette approche a également été appliquée à la synthèse de voix chantée (Cook, 1991 ; Lu, 2002 ; Kim, 2003).

1.2.1 L'indépendance source-filtre, une hypothèse majeure

Une hypothèse majeure de cette théorie porte sur l'indépendance des parties « source » (vibration des plis vocaux dans le cas de sons voisés) et « filtre » (ajustement articulaire du conduit vocal, se comportant comme une cavité résonante). Cette hypothèse est une première approximation valable pour l'étude de la parole normale, mais elle est discutable dans le cas de changement de qualité vocale (voix relâchée, pressée, voix forte, murmure), dans le cas du chuchotement, du cri, de la parole projetée (e.g. voix des acteurs), dans les productions vocales

1. Le terme « pneumo- », du grec ancien *pneûma*, signifie le souffle, la respiration. Le terme « phono- », du grec ancien *phone*, signifie le son, la voix. Le terme « résonantiel » fait référence à l'impact acoustique des gestes articulaires sur les propriétés de résonance du conduit vocal.

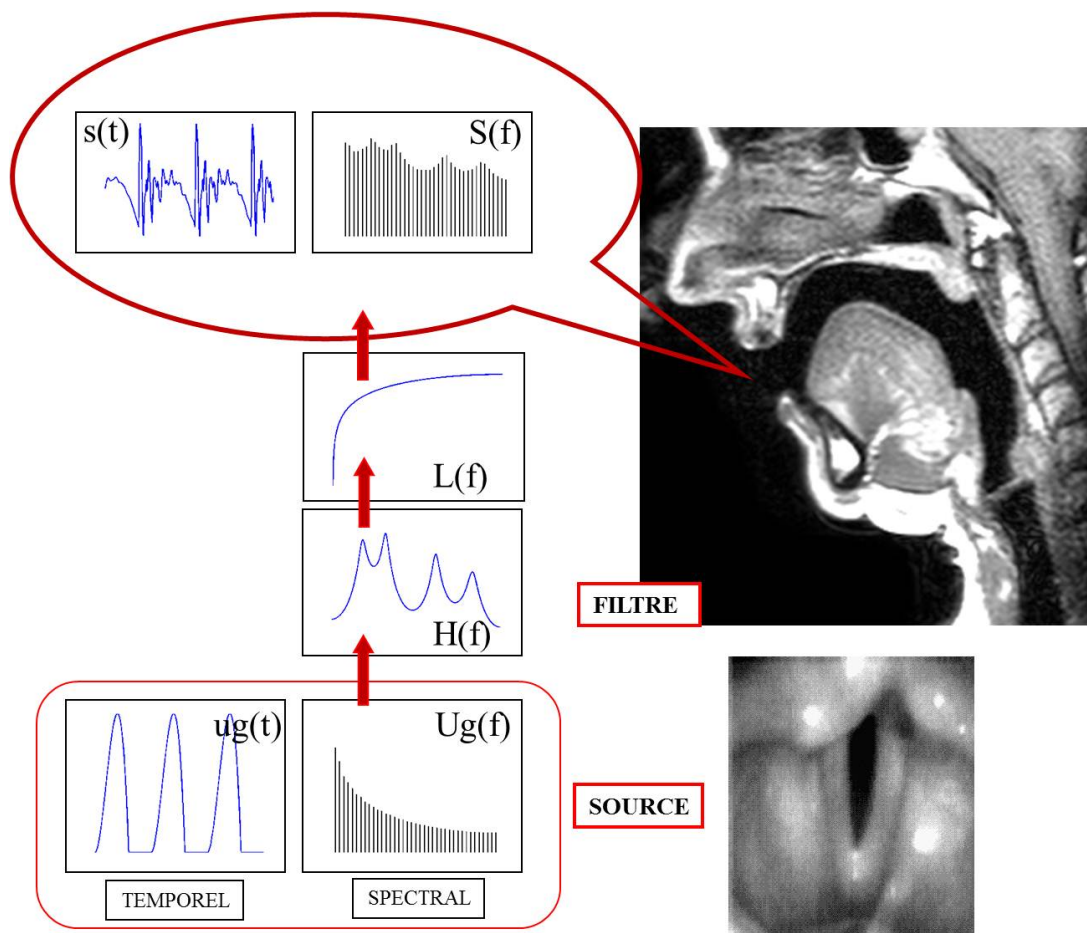


FIGURE 1.2 – Illustration de la théorie source-filtre linéaire

dysphoniques d'origine fonctionnelle, et dans le cas du chant (Klatt and Klatt, 1990 ; Fant, 1993 ; Childers and Wong, 1994 ; Henrich, 2001 ; Titze, 2008a). Dans ces types de phonation, l'interaction entre le système respiratoire et vibratoire d'un côté et le système résonant de l'autre peut devenir prépondérante et invalider les prédictions/modélisations de la théorie source-filtre. Les interactions pneumo-phono-résonantielles sont mis en avant dans la pratique quotidienne des thérapeutes de la voix et des professeurs de chant. Pour maîtriser l'efficacité vocale et la qualité des sons produits, les locuteurs ou chanteurs apprennent à ajuster leur contrôle respiratoire, phonatoire et articulaire dans une recherche d'équilibre. Ils couplent ainsi le mouvement vibratoire des plis vocaux au positionnement des structures supra-laryngées. Ces stratégies d'ajustement pneumo-phono-résonantiel au quotidien révèlent les limites de l'hypothèse d'indépendance sur laquelle se fonde la théorie source-filtre.

1.3 Les interactions source-filtre

Les interactions pneumo-phono-résonantielles sont multiples.

(1) La pression d'air en entrée du système influence directement la vibration glottique, par l'existence d'un seuil de pression phonatoire en-deçà duquel la vibration glottique ne peut s'initier

(Titze, 1992).

(2) L'auto-oscillation des plis vocaux est fortement dépendante de la configuration supra-glottique, en particulier du degré de constriction du tube épilaryngé (Titze and Story, 1997; Titze, 2004a, 2004b, 2008a; Titze et al. 2008b, Bailly et al., 2008, Lucero et al., 2012).

(3) La forme de l'onde de débit glottique est dépendante du couplage acoustique avec les conduits sous- et supra-glottiques. Cette interaction est partiellement prise en compte dans la modélisation de la source glottique, à travers des paramètres glottiques tels que le quotient de vitesse ou le coefficient d'asymétrie (Doval et al., 2006). Des « rebonds » peuvent apparaître sur l'onde de débit glottique du fait de l'interaction avec l'onde stationnaire due à la première résonance du conduit vocal. Quand la fréquence de vibration des plis vocaux est suffisamment basse par rapport à la fréquence de la première résonance du conduit vocal, cette influence du filtre sur la source peut être négligée. C'est le cas de la voix parlée normale de l'adulte : la fréquence fondamentale varie de 100 à 150 Hz pour l'homme et de 180 à 260 Hz pour la femme (Lee et al., 1999), ce qui est en-dessous des fréquences de la première résonance pour la plupart des voyelles. En voix chantée, ou dans le cas de la voix parlée de l'enfant, cet effet d'interaction source-filtre n'est plus négligeable. Plusieurs études ont montré que les sopranes ajustent la fréquence de la première résonance dès que la hauteur de la note chantée l'impose (Sundberg, 1975; Joliveau et al., 2004; Garnier et al., 2010a; Henrich et al., 2011a). De façon plus générale, tous les chanteurs adultes adaptent la fréquence de la première résonance à la fréquence de vibration des plis vocaux à partir de la hauteur chantée pour laquelle résonance et fréquence fondamentale de vibration se retrouvent proches, et ceci quelle que soit la voyelle chantée (Henrich et al., 2011). Dans ces zones où fréquence de résonance du conduit vocal et fréquence de vibration des plis vocaux sont comparables, des phénomènes de perturbation sont mis en évidence sur des exercices de vocalises en voix chantée : sauts de fréquence non liés à une transition de mécanismes laryngés, baisse sensible de l'intensité acoustique produite (Hatzikirou et al., 2006; Titze et al., 2008b). La proximité entre la première résonance du conduit vocal et le second harmonique de la source glottique a également été démontrée en chant classique (Henrich et al., 2011) et dans d'autres styles de chant (chant bulgare féminin : Henrich et al., 2007; comédie musicale : Bourne et Garnier, 2012).

Enfin, si le conduit vocal influence la source glottique, la réciproque est aussi une réalité physique, car les propriétés géométriques et oscillatoires de la source glottique vont influencer les propriétés acoustiques du conduit vocal. Les conditions aux limites à la source peuvent avoir un impact non négligeable sur la fréquence et la largeur de bande des résonances acoustiques (Barney et al., 2007). L'interaction source-filtre est une réalité physique qui avait déjà été observée dans les premiers systèmes de synthèse par modèles masse-ressort. Le modèle à une masse de Ishizaka et Flanagan (1972) a besoin d'une charge acoustique supra-glottique (présence d'un conduit vocal) pour osciller. Le modèle à deux masses des mêmes auteurs, qui fait encore référence aujourd'hui (Pelorson et al., 1994; Ruty, 2007), présente des phénomènes de bifurcation et des sauts de fréquence quand f_0 passe à proximité de R_1 .

1.4 Conclusion

La ligne directrice de mes travaux de recherche est de décrire les manifestations physiologiques, phonétiques et physiques des interactions pneumo-phono-résonantielles en voix humaine, et de modéliser ces phénomènes pour en comprendre l'impact sur la production vocale en termes de qualité vocale, de rendement et d'efficacité acoustique. L'objectif à long terme de cette démarche scientifique est la compréhension des gestes vocaux dits « à risque ». En quoi sont-ils «

à risque » ? Quels sont les risques vocaux possibles ? Quelles sont les stratégies possibles pour les prévenir ou les corriger ?

Il existe un verrou technologique majeur : comment appréhender les interactions pneumo-phono-résonantielles avec les méthodes d'analyse de la voix actuelle ? En effet, les méthodes d'analyse de la voix s'appuient sur les hypothèses théoriques fortes de la théorie source-filtre, en particulier l'indépendance entre source et filtre. C'est en particulier le cas de l'ensemble des techniques d'estimation formantique pour la caractérisation des propriétés acoustiques du conduit vocal et de filtrage inverse pour la caractérisation de l'onde de débit glottique. Nous nous sommes intéressés à développer des techniques qui ne s'appuient pas sur les hypothèses de la théorie source-filtre, et qui permettent des mesures physiologiques, de préférence non-invasives, pour observer les comportements respiratoires, phonatoires et articulatoires de l'humain en phonation.

La théorie source-filtre est une référence incontournable pour l'analyse-synthèse de la parole normale. Nos recherches visent à compléter ce cadre théorique afin qu'il permette d'appréhender l'ensemble des gestes vocaux de la parole, en particulier les gestes liés à un effort vocal ou à la modification de qualité vocale. Il y a là un verrou théorique important : comment les phénomènes d'interactions pneumo-phono-résonantielles peuvent-ils être intégrés dans la théorie source-filtre de production de la voix humaine ? Par ces travaux, nous proposons des pistes de réflexion sur la façon de les prendre en compte dans le cadre théorique existant.

Méthodes expérimentales pour l'étude de la voix humaine

Notre instrument vocal humain est caché du regard, en interaction avec les fonctions fondamentales que sont la respiration et la déglutition. Il est sous l'influence de nos ressentis, de nos émotions. Explorer son comportement physiologique reste un défi très actuel. De nombreuses recherches sont menées pour développer, améliorer, ou adapter des technologies expérimentales qui permettent d'analyser ou mesurer la voix sans interférer avec la production du son. Si l'on s'intéresse aux phénomènes d'interaction source-filtre, ces techniques expérimentales non-invasives doivent également permettre de mesurer les propriétés physiologiques de la source et du filtre en phonation indépendamment de tout hypothèse théorique. Ces recherches vont être décrites ici, selon les trois axes que sont la respiration, la phonation et l'articulation.

2.1 Mesure de la pression sous-glottique

La pression sous-glottique est un paramètre de première importance pour l'analyse et la modélisation du comportement phonatoire humain. Sa mesure directe est très invasive, puisqu'elle nécessite de placer un capteur de pression en-dessous du plan glottique. De nombreuses méthodes expérimentales se sont développées depuis des décennies pour l'estimer de façon indirecte. La méthode la plus répandue dans les milieux scientifiques et médicaux est de l'estimer au moment de l'occlusion dans des séquences syllabiques plosive-voyelle (« *papapapapa* »). Néanmoins peu d'études ont validé cette approche en parole en prenant en compte la qualité vocale (voix pressée, relâchée, murmurée, forte, criée, ...). Aucune étude ne l'a validée dans le cas du chant, alors que cette méthode d'estimation est régulièrement utilisée pour caractériser des styles de chant.

Grâce à l'audace d'une équipe de cliniciens marseillais (Pr. Antoine Giovanni, Dr. Benoît Amy de la Bretèque), des mesures directes de pression sous-glottique ont été effectuées en milieu hospitalier (CHU La Timone) par ponction et placement d'un cathéter au niveau du premier anneau trachéal (entre le cricoïde et le premier anneau, ou entre les deux premiers anneaux). Cinq campagnes de recueil de données ont été menées entre 2007 et 2012, qui sont détaillées dans la thèse de Benoît Amy de la Bretèque (2014). Les bases de données comprennent les signaux audio, électroglottographiques (EGG), les signaux de pression sous-glottique directe et de pression intra-orale, éventuellement le débit d'air oral et le débit d'air nasal, enregistrés de façon simultanée au moyen de la station EVA2 (SQ-Lab, CNRS, Aix-en-Provence). Quatre sujets (des chercheurs impliqués dans le projet) ont été étudiés : deux hommes (un chanteur entraîné, un

non chanteur) et deux femmes (deux chanteuses entraînées).

Ces données ont permis d'explorer la validité de la méthode d'estimation de la pression sous-glottique à partir de la pression intra-orale pour différentes qualités vocales parlées et chantées. La comparaison entre pression sous-glottique mesurée directement ou estimée à partir de la pression intra-orale a montré que la méthode d'estimation est valide pour la parole usuelle et pour le chant dans des gammes d'intensité normale à forte. Des divergences apparaissent pour des productions de faible intensité, et des productions chantées dans l'aigu en mécanisme M2.

Cette étude comparative a également permis de mettre en évidence un ensemble de biais expérimentaux possibles dans l'estimation indirecte de la pression sous-glottique telle qu'elle est pratiquée en clinique.

Cette technique de mesure directe de la pression sous-glottique a permis d'explorer le comportement respiratoire en lien avec la phonation : profil vocal de pression sous-glottique en voix chantée ; interaction entre la pression sous-glottique, l'intensité et les paramètres d'onde de débit glottique ; impact aérodynamique d'une constriction aux lèvres.

Publications et communications associées :

- Lagier A., Henrich N., Amy de la Bretèque B., Giovanni A. (2009) The possibilities and limitations of estimating subglottal pressure from intra-oral pressure in speech and singing, Voice Foundation's 38th Annual Symposium : Care of the Professional Voice, Philadelphia, USA.
- Lagier A., Henrich N., Amy de la Bretèque B., Giovanni A. (2009) Évaluation de la méthode d'estimation de la pression sous-glottique par la pression intra-orale en voix chantée. 3ièmes Journées de Phonétique Clinique, Aix-en-Provence, Déc. 2009.
- Henrich N., Lagier A., Amy de la Bretèque B., Giovanni A. (2012) Can subglottal pressure be estimated from intra-oral pressure in speech and singing?, International Voice Symposium, NYU Steinhardt, New York, USA. [invited lecture]

2.2 Visualisation de la vibration glottique et mesure du contact

2.2.1 Cinématographie ultrarapide et transillumination strobophotoglottographique

Les techniques actuelles d'imagerie glottique permettent une observation fine du comportement vibratoire des plis vocaux. En collaboration avec une équipe hospitalière (Pr. Markus Hess et Frank Müller, Department of Phoniatics and Pedaudiology, University Hospital Eppendorf, Hambourg, Allemagne), plusieurs bases de données d'images endoscopiques ont été enregistrées par cinématographie ultra-rapide (2000 à 4000 images/seconde) en 2004 (un locuteur, un chanteur), 2006 (un locuteur, un chanteur) et 2008 (3 locuteurs, enregistrés par Lucie Bailly). Ces bases de données comportent également l'enregistrement simultané des signaux audio et électroglottographique (échantillonnés à 44170 Hz sur 8 bits). Elles permettent d'explorer le comportement vibratoire des structures laryngées (plis vocaux, plis vestibulaires, membranes ary-épiglottiques) pour des expressions vocales très variées : parole, chant, cri, grognement, rire.

Une étude de la visualisation par transillumination strobophotoglottographique a été menée en 2003 (voir un exemple sur la Figure 2.1) pour tenter de reconstruire le mouvement glottique sur l'épaisseur et étudier la possibilité de transposer la technique à la cinématographie ultra-rapide.

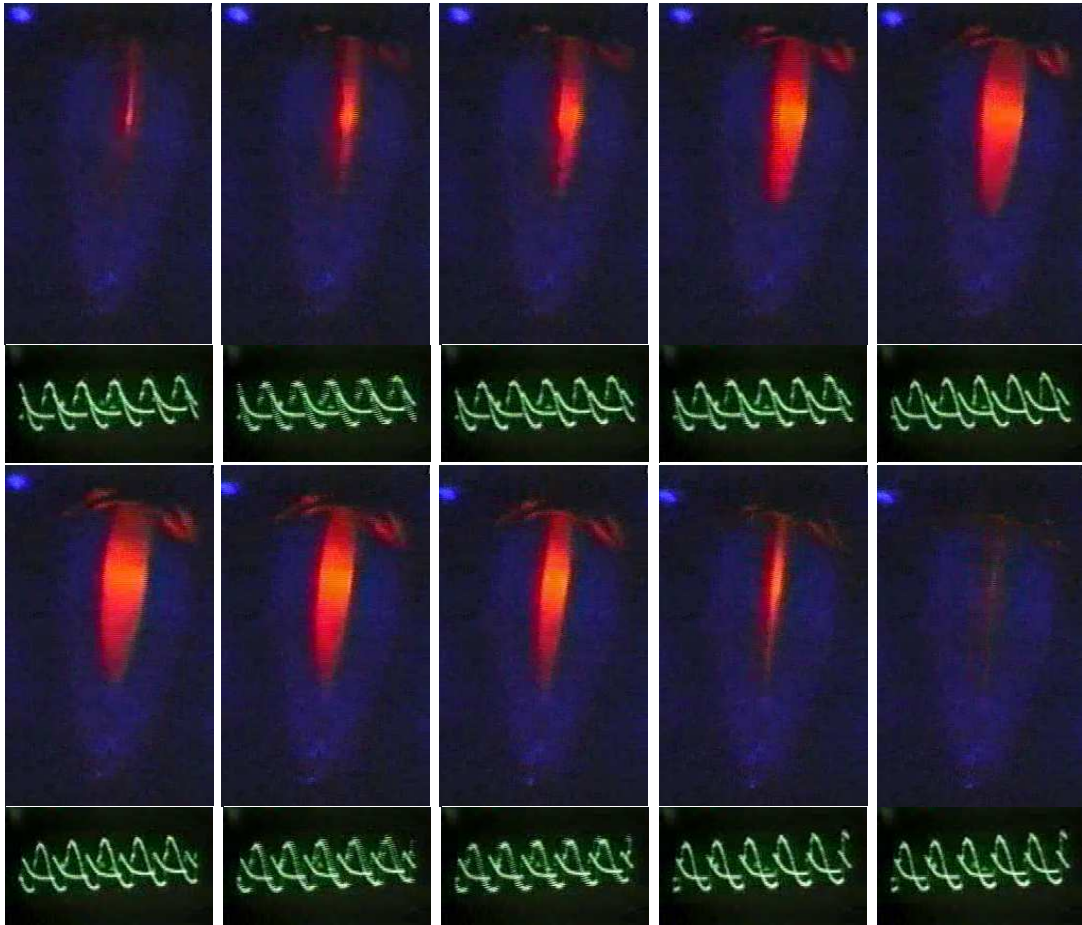


FIGURE 2.1 – Illustration d'un cycle glottique observé par transillumination strobophotoglottographique. D'après Henrich et al., 2003

Publications et communications associées :

- Henrich N., Hess M., Schade G., Neubauer J., Mantay C. and Kirchhoff T. (2003) The transillumination technique and its applications : first results, In proc. 6th International Conference Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research, Hamburg, Germany, Apr. 2003. Eds. G. Schade, F. Müller, Th. Wittenberg, M. Hess, IRB Verlag, Stuttgart, Germany.
- Henrich N., Gendrot C., Schade G., Muller F., Expert R. (2004) Characterization of features observed on the derivative of EGG signal by the use of high speed cinematography, in International Conference on Voice Physiology and Biomechanics, Marseille, France, Aug. 2004.
- Gendrot C., Henrich N., Schade G., Muller F., Expert R. (2004) Vocal folds vibratory patterns of laryngeal mechanism M0 as investigated with high speed cinematography and electroglottography, in International Conference on Voice Physiology and Biomechanics, Marseille, France, Aug. 2004.

2.2.2 Détection du contour glottique et glottovibrographie

La technique de cinématographie laryngée ultrarapide fournit un nombre conséquent de données qu'il faut pouvoir analyser et présenter de façon compacte et informative. Nous avons donc cherché à améliorer et automatiser les outils d'analyse du contour glottique dans les images laryngées obtenues par cinématographie ultra-rapide. En premier lieu, des méthodes de détection

par seuillage et sélection semi-automatique de contours ont été appliquées. Puis une méthode automatique de détection du contour glottique a été élaborée dans le cadre d'un stage de Master (Sevasti-Zoi Karakozoglou, 2010) en collaboration avec Christophe d'Alessandro (LIMSI) et Yannis Stylianou (Computer Science Dept., Univ of Crete, Heraklion, Greece). Nous avons appliqué et adapté une approche par contours actifs au niveau local pour la segmentation glottique. Cette méthode permet de détecter la glotte avec une grande précision et une bonne robustesse, qui ont été testées sur une base de 60 séquences cinématographiques (Hambourg, 2004). La GlottoVibroGraphie, une représentations de données permettant de réduire le nombre de dimensions de l'information spatio-temporelle et de présenter les données cinématographiques de façon compacte et sans perte, a été proposée. Elle est illustrée sur la Figure 2.2.

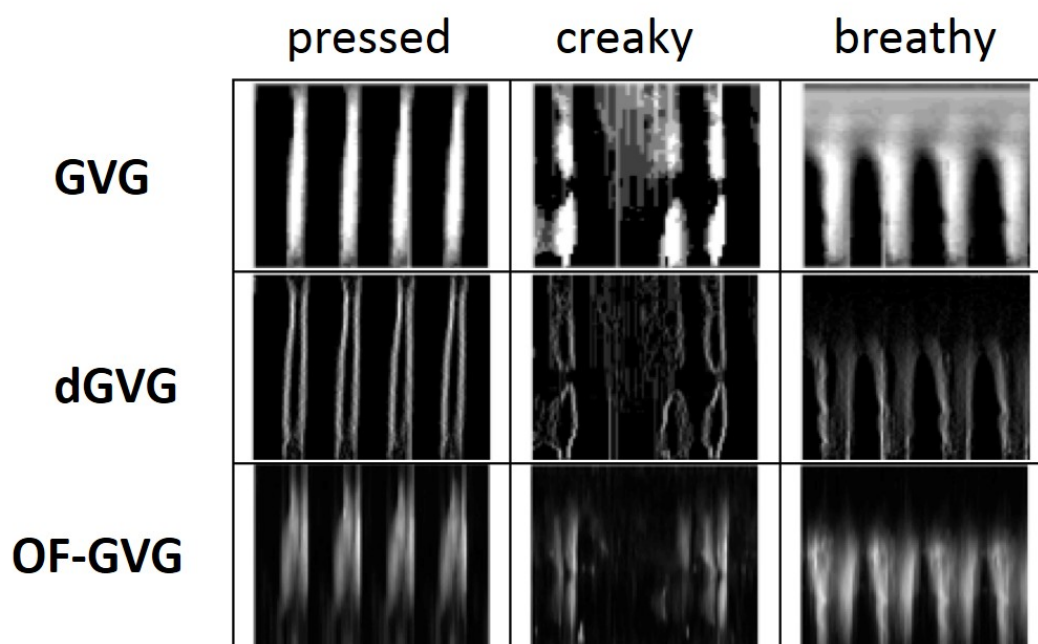


FIGURE 2.2 – Présentation des données de cinématographie ultrarapide sur plusieurs cycles glottiques pour diverses séquences avec variation de la qualité vocale. GVG et dGVG : glottovibrogramme et sa dérivée ; OF-GVG : glottovibrogramme par flux optique. D'après Andrade-Miranda et al., MAVEBA 2015

Actuellement, nous explorons la transposition à la cinématographie ultrarapide laryngée des techniques récentes de suivi d'objets en mouvement par analyse du flux optique, dans le cadre de la thèse de doctorat de Gustavo Andrade-Miranda en collaboration avec Juan Ignacio Godino Llorente (Université de Madrid, Espagne). L'analyse des images laryngées par flux optique permet de détecter les mouvements des structures glottiques sans nécessiter la détection du contour glottique. Les réductions de données spatio-temporelles proposées s'inspirent des techniques classiques de kymographie, de phonovibrographie et de glottovibrographie. La Figure 2.2 présentent une représentation comparative de la dérivée d'un glottovibrogramme (dGVG) avec un glottovibrogramme calculé à partir du flux optique (OF-GVG).

Publications et communications associées :

- Karakozoglou S-Z, Henrich N., d'Alessandro C., Stylianou Y. (2010) Automatic glottal segmentation using local-based active contours, 9th International Conference Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research, Erlangen, Germany, 10-11 Sept. 2010.
- Karakozoglou S., Henrich N., d'Alessandro C., Stylianou Y. (2012) Automatic glottal segmentation using local-based active contours and application to glottovibrography, *Speech Communication* vol.54 (5), pp. 641-654.
- Andrade-Miranda G., Henrich Bernardoni N., Godino llorente J.I. (2015) A new technique for assessing glottal dynamics in speech and singing by means of optical-flow computation. In *Proceedings Interspeech 2015*, Dresden, Allemagne.
- Andrade-Miranda G., Henrich Bernardoni N., Godino llorente J.I. (2015) Optical-flow kymograms and glottovibrograms : a new way to present highspeed data for laryngeal assessment. In *Proceedings 9th Int. Workshop MAVEBA 2015*, Firenze, Italy.

2.2.3 Analyse du signal électroglottographique dérivé

L'électroglottographie est une technique très répandue en clinique de mesure du contact glottique à partir de la résistance laryngée au passage d'un courant de faible intensité (voir Henrich, 2001 ou Henrich et al., 2004 pour une revue de la littérature). Les travaux menés sur la dérivée du signal électroglottographique (DEGG) ont mis en évidence des singularités dans le signal, comme un dédoublement des pics observés sur le signal DEGG à l'ouverture ou à la fermeture glottique en lien avec la diminution ou l'augmentation rapide de contact entre les plis vocaux, une multiplicité ou une imprécision du pic lié à l'ouverture glottique. Ces observations robustes traduisent un comportement laryngé sous-jacent, que nous avons cherché à analyser en s'appuyant sur une caractérisation des signaux électroglottographiques dérivés au moyen de la cinématographie ultrarapide. L'enjeu est ici de comprendre les corrélats physiologiques liés à ces particularités du signal DEGG, pour permettre ensuite une analyse indirecte mais fine du comportement de contact glottique en phonation. A partir de la base de données de cinématographie ultrarapide et électroglottographie enregistrée en 2004 à Hambourg, nous avons observé le rôle de la partie membraneuse antéro-médiane des plis vocaux sur la précision du pic de fermeture ou d'ouverture glottique lors de la phase de contact ou de décollement des plis vocaux. Nous avons montré qu'un pont muqueux entre les deux plis n'induit pas forcément le dédoublement des pics comme suggéré dans la littérature. Récemment, l'amélioration de la vitesse d'acquisition des caméras a permis d'étudier la synchronie entre l'instant de contact ou de décollement des plis vocaux et les maxima et minima des signaux électroglottographiques dérivés (Herbst et al., 2014). L'étude a été menée sur larynx excisé avec une caméra ultrarapide permettant d'acquérir 27000 images/s. La précision de synchronisation entre l'acquisition des images et celle des signaux EGG est de l'ordre de $0.037ms$. Cette étude confirme que les pics observés sur les signaux DEGG correspondent à des instants de contact ou de décollement des plis vocaux observés sur les images laryngées. Sur les quatre séquences étudiées, le décalage entre le pic DEGG de fermeture glottique et l'instant de fermeture complète varie entre 0.51% et 7.88% de la durée du cycle vibratoire selon le type de fermeture. Le pic DEGG d'ouverture glottique apparaît à l'instant d'initialisation de l'ouverture observée dans les images ou le suit rapidement, avec un délai compris entre 2.94% et 10.88% pour trois des séquences. Cette étude montre en particulier le lien entre les dédoublements de pic à la fermeture glottique et la présence de modes vibratoires antéro-postérieurs des plis.

Publications et communications associées :

- Henrich N. , d'Alessandro C. , Castellengo M. and Doval B. (2004) On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of nonpathological phonation, *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 115

(3), pp. 1321-1332.

- Henrich N., Gendrot C., Schade G., Muller F., Expert R. (2004) Characterization of features observed on the derivative of EGG signal by the use of high speed cinematography, in International Conference on Voice Physiology and Biomechanics, Marseille, France, Aug. 2004.
- Herbst CT, Lohscheller J, Švec JG, Henrich N, Weissengruber G, Fitch WT. (2014) Glottal opening and closing events investigated by electroglottography and super-high-speed video recordings. J Exp Biol. 2014 Mar 15 ;217(Pt 6) :955-63.

2.2.4 Reconstruction par imagerie électrique du contact glottique sur l'épaisseur

L'électroglottographie renseigne sur le contact glottique de façon globale, sans fournir d'information sur la façon dont le contact se réalise sur l'épaisseur et la longueur des plis vocaux. L'endoscopie laryngée fournit elle-aussi une image partielle du contact glottique, puisque le comportement sur l'épaisseur est occulté dans la phase d'ouverture, et souvent difficile à visualiser dans la phase de fermeture. Une technologie qui permette de mesurer le contact des plis vocaux sur les trois dimensions spatiales révolutionnerait certainement notre compréhension du fonctionnement laryngé en phonation. Dans ce contexte, un projet collaboratif de mécatronique a été initié avec Thomas Hélie (IRCAM), avec comme objectif principal la conception d'un électroglottographe multi-capteurs à multiplexage fréquentiel et son test sur maquette d'un larynx humain. Ce projet VoiceTonics a été mené sur les deux années scolaires 2010-2011 et 2011-2012 avec des étudiants de l'Ecole des Mines de Paris (Mines ParisTech) et leurs enseignants de Mécanique (Frédéric Bruyère) et d'Electronique (Denis Brousse), un doctorant, Thomas Hézard, et avec la participation sur la période 2011-2012 de deux ingénieurs (Thierry Legou, Malte Kob) et d'un médecin (Aude Lagier).

En s'inspirant de deux approches complémentaires (l'électroglottographie et la tomographie par impédance électrique), un système électronique a été conçu. Il est constitué d'une matrice d'électrode qui reçoivent et émettent des signaux orthogonaux superposés et modulables, associée à un système de modulation-démodulation des signaux. Deux maquettes simplifiées du larynx humain ont été réalisées aux échelles 1 et 4, l'une pour tester le dispositif et l'autre dans un but pédagogique pour l'illustration des articulations laryngées. Ce projet s'est poursuivi par la suite sans mon implication.

Publications et communications associées :

- Hézard T., Hélie T., Doval B., Henrich N., Kob M. (2012) Non-invasive vocal-folds monitoring using electrical imaging methods, In Proc. 100 years of electrical imaging, Paris, 2012

2.3 Analyse du signal de source glottique en voix chantée

Les travaux menés au cours de ma thèse se sont appuyés sur le cadre théorique des modèles de signaux pour l'analyse et la synthèse de la source glottique (Henrich, 2001). Un formalisme unifié des modèles d'onde de débit glottique a été développé et appliqué à l'étude des corrélats spectraux des paramètres de source glottique (Henrich et al., 2001, Doval et al., 2006). Les méthodes classiques d'estimation formantique et de filtrage inverse ont été testées sur des signaux synthétiques et sur des signaux réels.

Récemment, un projet collaboratif a été initié à la demande d'une équipe de l'Université de Mons, dans le cadre de la thèse de doctorat d'Onur Babacan. Cette équipe spécialisée dans la

synthèse de la parole a souhaité développer une approche innovante d'analyse et de synthèse de voix chantée, à partir des techniques et algorithmes mis en application dans le cadre de la parole.

Une première étude a porté sur l'estimation des instants de fermeture glottique (GCI). Les performances des algorithmes existants pour la parole ont été testées sur une large base de données de voix chantée (base de données LYRICS, Henrich N. 2001). Les techniques évaluées sont : (1) une identification temporelle de pics sur le signal résiduel de la prédiction linéaire et un suivi par programmation dynamique (Dynamic Programming Phase Slope Algorithm, DYP-SA), (2) la même technique appliquée sur l'estimée de l'onde de débit glottique dérivée (Yet Another GCI Algorithm, YAGA), (3) une identification temporelle de pics sur le signal résiduel de la prédiction linéaire après soustraction de la moyenne par fenêtre glissante (Speech Event Detection using the Residual Excitation And a Mean-based Signal, SEDREAMS), (4) une détection basée sur l'enveloppe de Hilbert du signal résiduel (Hilbert Envelope-based detection, HE), (5) une méthode utilisant des résonateurs à fréquence nulle (Zero Frequency Resonator-based method, ZFR). Les possibilités et limites de ces algorithmes ont été explorées selon la qualité de voix, la tessiture vocale, et le mécanisme laryngé utilisé. Globalement, l'approche la plus robuste est la technique SEDREAMS.

Dans une seconde étude, les techniques les plus couramment utilisées pour l'analyse de la fréquence fondamentale (f_0) sur un signal de parole ont été testées sur la même base de données de voix chantée. Les techniques d'estimation de f_0 évaluées sont : PRAAT, RAP-T, SRH, SSH, STRAIGHT, YIN. Une référence a été élaborée par application de la technique RAP-T sur les signaux électroglottographiques et par vérification manuelle des résultats. Plusieurs métriques d'évaluation des erreurs d'estimation ont été utilisées (erreur grossière, erreur fine, erreur de voisement, performance globale de la technique). Les résultats dépendent fortement de ces métriques. Les techniques d'analyse PRAAT et RAP-T ont été les plus performantes pour la détermination des limites de voisement. La technique RAP-T (appliquée sur signal audio) a donné le taux le plus bas d'erreurs grossières. La technique YIN a permis la meilleure précision des estimations (taux le plus bas d'erreurs fines). La performance des techniques est dépendante de la tessiture vocale, avec de meilleurs résultats pour les signaux des sopranes que pour ceux des barytons ou des contre-ténors, et du mécanisme laryngé utilisé, avec de meilleurs résultats en mécanisme M2. La robustesse des techniques sur des signaux dégradés par ajout d'une réverbération a également été testée, démontrant la robustesse de la technique STRAIGHT à la dégradation du signal.

Publications et communications associées :

- Henrich N., d'Alessandro C. and Doval B. (2001) Spectral correlates of voice open quotient and glottal flow asymmetry : theory, limits and experimental data EUROSPEECH 2001, Aalborg, Denmark, Sept. 2001.
- Doval B., d'Alessandro C. and Henrich N. (2006) The spectrum of glottal flow models, Acta Acustica united with Acustica, vol. 92, pp. 1026-1046.
- Babacan O., Drugman T., d'Alessandro N., Henrich N., Dutoit T. (2013) A Quantitative Comparison of Glottal Closure Instant Estimation Algorithms on a Large Variety of Singing Sounds. Proceedings of the 14th Conference of the International Speech Communication Association (Interspeech 2013), Lyon, France, August 25-29.
- Babacan O., Drugman T., d'Alessandro N., Henrich N., Dutoit T. (2013) A comparative study of pitch extraction algorithms on a large variety of singing sounds, Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2013), Vancouver, Canada, May 26-31

2.4 Impédancemétrie aux lèvres pour la mesure des résonances acoustiques du conduit vocal en phonation

Le comportement acoustique du conduit vocal est communément estimé sur le signal vocal mesuré en sortie des lèvres au moyen des techniques d'estimation formantique ou d'analyse cepstrale. Ces techniques s'appuient sur le cadre théorique source-filtre. Pouvoir mesurer physiquement les résonances du conduit vocal en phonation indépendamment de toute hypothèse théorique est un challenge très actuel dans lequel une équipe australienne travaillant sur l'acoustique des instruments de musique est pionnière (Pr. Joe Wolfe et Pr. John Smith, School of Physics, University of New South Wales, Australie). Ils ont développé un dispositif d'impédancemétrie par injection acoustique aux lèvres (RAVE) dans le but de permettre la mesure physique des résonances du conduit vocal (Epps et al., 1997). Ce dispositif RAVE est constitué d'un haut-parleur couplé à un adaptateur d'impédance. Il permet l'injection d'une source acoustique de manière localisée et à forte impédance. La source acoustique est calibrée préalablement pour être à spectre plat. Elle charge le conduit vocal d'un locuteur ou d'un chanteur en phonation. La réponse à cette charge acoustique est enregistrée par un microphone extérieur placé en sortie des lèvres à proximité du tube d'injection.

Un projet d'échange international FAST (PHC France-Australie) a été mené avec comme objectifs :

1. d'effectuer un transfert et un échange technologique entre les deux équipes, pour reproduire sur le site français la plate-forme expérimentale mise en place sur le site australien.
2. de tester la plate-forme sur le site français, à partir de maquettes simplifiées du conduit vocal, éventuellement couplées à des répliques auto-oscillantes des plis vocaux.
3. d'effectuer des simulations numériques et une évaluation théorique sur maquette.

Ces travaux, initiés dans le cadre d'une première thèse de doctorat (Laurent Huguet, 2008-2012) se sont poursuivis dans le cadre d'une seconde thèse de doctorat (Cédrik Erbsen, 2010-2015).

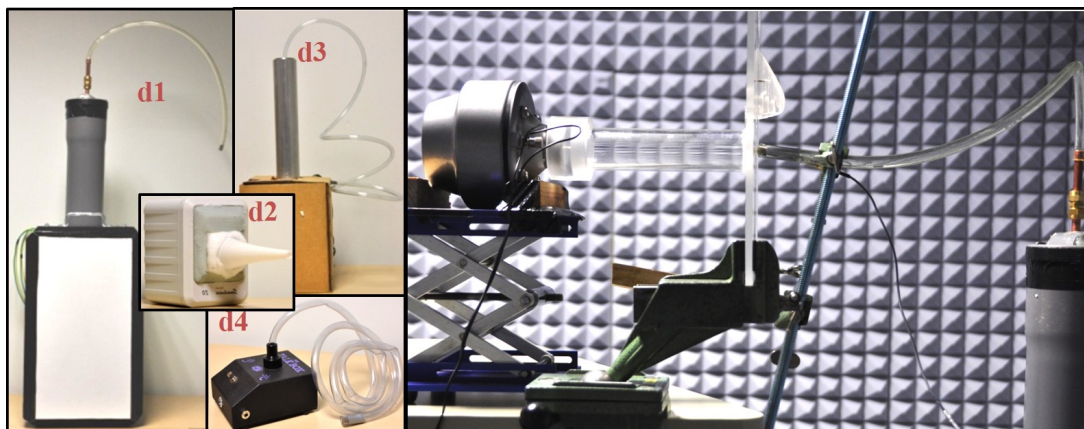


FIGURE 2.3 – Dispositifs d'impédancemétrie (d1 : réplique du dispositif australien, d2 : haut-parleur avec cône d'impédance, d3 : chambre de compression avec cône exponentiel, d4 : Talk Box) et banc de test en chambre anéchoïque.

La plate-forme australienne d'impédancemétrie aux lèvres a été reproduite sur le site fran-

çais. D'autres prototypes du dispositif ont été construits, qui sont des dispositifs plus compacts, visant à être transportables. Des améliorations ont été amenées sur la réponse en fréquence du haut-parleur utilisé dans le dispositif. La réponse en fréquence des différents prototypes développés sur le site français a été testée en chambre sourde (voir une illustration des dispositifs et du banc de test sur la Figure 2.3). Ces dispositifs ont été comparés à un dispositif d'injection acoustique à but d'effet musical, la Talk Box HT-1 Heil commercialisée par Dunlop. Leurs possibilités et limitations pour la mesure formantique ont été testées sur des répliques simplifiées du conduit vocal.

Une nouvelle approche innovante de la mesure des résonances par injection acoustique de sinus glissants a été développée par la suite, dans le cadre de la thèse de Cédrik Erbsen. Elle s'inspire d'une technique développée pour la reproduction stéréophonique ou la caractérisation de l'acoustique des salles, la technique des sinus glissants à fréquence instantanée exponentielle (SGFIE) développée par A. Farina (2000). Dans les différents domaines où elle est employée, la technique des SGFIE sert à caractériser une fonction de transfert, celle du matériel audio pour la stéréophonie ou celle entre deux points de l'espace pour l'acoustique des salles. Un des principaux avantages de cette technique est qu'elle permet la caractérisation de systèmes même en fonctionnement saturé. La convolution de l'enregistrement d'une SGFIE avec son inverse permet d'obtenir la réponse impulsionnelle en régime linéaire d'un dispositif. Les résultats liés à la saturation sont écartés au moment du traitement numérique. Les mesures peuvent alors être effectuées alors même que le système ou l'appareil de mesure présente des distorsions harmoniques, ce qui peut arriver dans l'excitation acoustique du conduit vocal à fort volume.

Dans la technique traditionnelle de mesure d'impédancemétrie du conduit vocal, l'estimation du rapport d'impédance en entrée du conduit vocal se fait en module à partir d'un signal excitateur composé d'un bruit blanc large bande. Les phases ne sont pas parfaitement connues, ce qui empêche une détermination précise de la largeur de bande des pics d'impédance. La longueur de flexible utilisée pour l'injection acoustique induit de faibles non-linéarités qui s'associent pour distordre le signal envoyé en cas de fort volume sonore. Ces imperfections dans l'estimation de l'impédance du conduit vocal peuvent être corrigées grâce à l'emploi des SGFIE. Les SGFIE étant parfaitement définies en module et en phase, la réponse impulsionnelle que l'on obtient par cette méthode permet de déterminer très précisément le module et la phase du système. De plus, la capacité des SGFIE à s'affranchir des problèmes de distorsion permet de maximiser la puissance du signal injecté.

La technique d'impédancemétrie par injection acoustique des SGFIE a été testée sur maquettes et sur l'humain. Elle a donné lieu à un dépôt de brevet. Ces travaux se poursuivent en collaboration avec Boris Doval (IJLRA) et Laurent Girin (GIPSA-lab et INRIA) pour supprimer l'influence du signal vocal enregistré sur la fonction d'impédance mesurée.

Publications et communications associées :

- Henrich N., Garnier M., Smith J., Wolfe J. (2012) Measurements of vocal-tract resonances in singing using the input-impedance technique, International Voice Symposium, NYU Steinhardt, New York, USA.
- Henrich Bernardoni N., Erbsen C., Doval B. (2014) Système et procédé pour mesurer l'impédance acoustique d'une cavité, Dépôt de brevet CNRS-UPMC 23/05/2014.

2.5 Suppléance vocale par injection acoustique aux lèvres

Les personnes ayant perdu temporairement ou définitivement l'usage des plis vocaux ont besoin d'une suppléance vocale pour continuer à s'exprimer et communiquer avec autrui. C'est en particulier le cas des laryngectomisés, ces personnes qui se retrouvent sans source phonatoire suite à l'ablation partielle ou totale du larynx, la plupart du temps du fait d'un cancer. Si l'on excepte la pose d'une prothèse vocale, acte très invasif et qui ne donne pas toujours les résultats escomptés, les solutions commerciales qui leur sont proposées sont des laryngophones ou électrolarynx (e.g. électrolarynx TruToneTM de Ceredas, <http://www.ceredas.com/trutone.php>). Ces systèmes actuels sont des actuateurs mécaniques, type « buzzer », qui s'appliquent généralement sur le cou. Ils sont plutôt limités du point de vue du contrôle de l'intonation, de l'expressivité et de la qualité de timbre de la source. En s'appuyant sur les connaissances acquises en modélisation de la production vocale, nous pouvons explorer des solutions alternatives à la suppléance vocale mécanique, qui gardent l'intérêt majeur d'utiliser le conduit vocal réel comme résonateur avec toute sa complexité, plutôt que de l'estimer à l'instar des systèmes d'analyse ou de synthèse traditionnels. Nous avons donc proposé un projet de conception et de développement d'un dispositif d'injection acoustique de la source glottique par la bouche qui fasse office de suppléance à la source phonatoire et permette aux personnes ayant des déficiences vocales d'articuler pour transformer le signal de source glottique injecté en signal de parole. Ce projet s'est inscrit dans le cadre de la thèse de Cédrik Erbsen, en co-direction avec Boris Doval, et il a été soutenu en 2011-2012 par un PEPS INSIS (projet SUBVOICE).

Nous avons fait le choix de prendre comme point de départ pour la conception du dispositif SUBVOICE le dispositif existant RAVE d'impédancemétrie par injection acoustique aux lèvres mentionné dans la partie 2.4. Pour permettre l'injection d'une source acoustique simulant une onde de débit glottique, nous avons choisi de caractériser préalablement la réponse impulsionnelle du système d'injection acoustique par la technique des sinus glissants à fréquence instantanée exponentielle SGFIE déjà décrite précédemment. Cette technique permet d'extraire de manière rapide et précise les informations de module et de phase d'un système, et donc d'inverser totalement un système par récupération de la réponse impulsionnelle complète et inversion. Elle permet également de calculer le taux de distorsion du système et donc de maximiser la puissance du signal envoyé. A partir de cette approche, il est donc possible d'injecter un signal synthétique contrôlé, comme une source de débit glottique calculée à partir des modèles mathématiques usuels.

Le dispositif d'injection acoustique d'une onde de débit glottique a été élaboré et testé. La prochaine étape de ce projet porte sur le positionnement de la source d'injection dans le conduit vocal. Il serait souhaitable de pouvoir utiliser l'espace palatal pour cela, à l'instar du dispositif UltraVoiceTM commercialisé aux USA (<http://www.ultravoice.com>).

Publications et communications associées :

- Erbsen C., Henrich N., Doval B. (2012) Conception of a new speech-aid device by injection of an acoustic source inside the mouth, 5th International Congress of World Voice Consortium, Luxor, Egypt.

3

Vibrations laryngées

La voix humaine est souvent ramenée à sa source sonore primaire, comme résultante de la mise en vibration des plis vocaux au sein du larynx. Bien que cette vision de la voix soit très réductrice, elle souligne le rôle fondamental que joue la vibration des plis vocaux dans la production vocale humaine. Comprendre la physiologie laryngée et les phénomènes physiques qui y sont associés est donc essentiel pour appréhender la complexité du phénomène vocal. Dans cette partie, nous nous intéressons tout d’abord à l’évolution des connaissances physiologiques sur le fonctionnement de l’instrument vocal humain, à travers la notion de registre vocal. Pour comprendre la nature laryngée d’un registre vocal, nous faisons appel aux connaissances acquises sur les mécanismes laryngés de la voix d’adulte. Identifier la nature laryngée d’un son vocal est un challenge. Nous verrons sur trois exemples (la voix mixte, la voix chantée de l’enfant pré-pubère, la voix de sifflet) comment les outils de mesure et d’analyse présentés au chapitre 2 peuvent nous permettre de mieux comprendre les processus sous-jacents à la production sonore d’un son voisé. Nous nous intéresserons également au comportement physiologique d’autres structures mobiles laryngées, les plis vestibulaires.

3.1 Registres vocaux et mécanismes laryngés

3.1.1 La petite histoire des registres vocaux

Jusqu’au milieu du XIX^e siècle, les connaissances sur la phonation humaine étaient limitées à la description anatomique de la tête et du cou, ainsi qu’aux sensations auditives et proprioceptives que l’on pouvait avoir en produisant un son parlé ou chanté. Les registres vocaux, mentionnés dans les traités de chant, étaient reliés à la perception de différents timbres de voix. C’est dans ce contexte que s’inscrivent les travaux exploratoires de Manuel Garcia Junior (1805-1906). Ce professeur de chant et anatomiste, grand pédagogue de la voix, met à profit une invention récente, le laryngoscope ou miroir du larynx inventé par Benjamin Guy Babington, pour observer le plan glottique en phonation (Castellengo, 2005). Dans ses travaux présentés dès 1840 à l’Académie des Sciences à Paris, il affirme que la voix humaine est composée de différents registres, qu’il dénomme *poitrine*, *fausset-tête* et *contre-basse* (Garcia, 1847). La tessiture correspondant à deux de ces registres est présentée Figure 3.1.

Dans sa définition des registres pointe déjà la notion d’un principe mécanique qui prévaut à toute considération de timbre :

“Par le mot registre, nous entendons une série de sons consécutifs et homogènes allant du grave à l’aigu, produits par le développement du même principe mécanique, et dont la nature diffère essentiellement d’une autre série de sons également consécutifs et homogènes, produits par un

autre principe mécanique. Tous les sons appartenant à un même registre sont, par conséquent, de la même nature, quelles que soient d'ailleurs les modifications de timbre ou de force qu'on leur fasse subir." (Garcia 1847, p. 4)

En appuyant son raisonnement sur des observations physiologiques du comportement laryngé, il affirme ensuite que les registres de fausset et de tête résultent selon lui d'un même principe mécanique laryngé :

"La séparation [entre registre de fausset et registre de tête] n'est pas le résultat d'un mécanisme différent du larynx, mais un effet de timbre (...)" (Garcia 1847, p. 18)

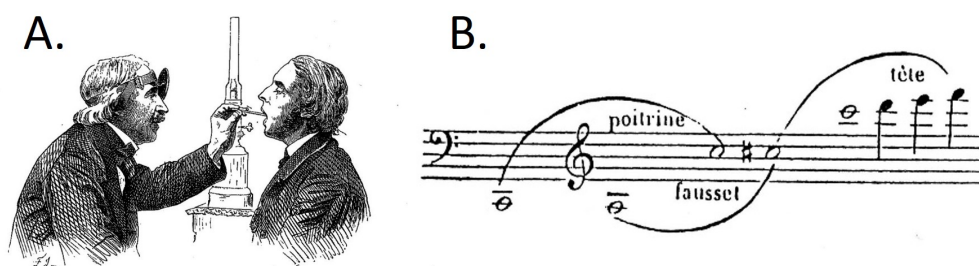


FIGURE 3.1 – A. Illustration de l'usage du laryngoscope (Garcia, 1884) B. Registres identifiés par Manuel Garcia dans son *Mémoire sur la voix humaine* (Garcia, 1847)

Cette référence à un principe mécanique ou à un mécanisme se retrouve dans les travaux contemporains du physiologiste Emil Behnke et du chirurgien Lennox Browne (Behnke, 1880). Ils distinguent trois mécanismes principaux dans la voix humaine, selon l'épaisseur de la masse vibrante et l'adduction ou non de la partie cartilagineuse des plis vocaux : "*thick*" (épais), "*thin*" (mince) et "*small*" (petit). Ils distinguent néanmoins un nombre de registres différents chez l'homme ou la femme : trois registres chez l'homme ("*lower thick*", "*upper thick*", "*upper thin*") et cinq registres chez la femme ("*lower thick*", "*upper thick*", "*lower thin*", "*upper thin*", "*small*"). Au début du XX^e siècle, seul un petit nombre de professeurs de chant maintiennent que la voix naturelle ne possède qu'un seul registre. La majorité des pédagogues ou des thérapeutes s'accordent sur l'existence d'au moins deux registres et d'au plus cinq registres. Certains auteurs, tels Wilcox (Vennard, 1967), remplacent le terme *registre* par le terme *mécanisme*, introduisant par là l'usage des termes "*heavy mechanism*" (mécanisme lourd) et "*light mechanism*" (mécanisme léger). La terminologie est variée, et variable d'un auteur à l'autre, ce qui amène une équipe Suédoise à publier une enquête de littérature portant sur la tessiture et la dénomination des registres vocaux (Mörner et al., 1963). Cette étude conclut que le seul dénominateur commun pour définir un registre semble être son étendue fréquentielle sur une échelle musicale. Elle montre un certain consensus sur la fréquence moyenne des limites entre registres, qui se traduisent par des ruptures ou des transitions vocales. Les deux registres les plus communs sont les registres "de poitrine" et "de tête" ou "falsetto", la distinction entre "tête" et "falsetto" étant fortement dépendante des auteurs. Les deux registres se recouvrent sur une zone de fréquence où un troisième registre est souvent mentionné : le registre "medium", "mid", "middle", "mixed", qui pourrait s'apparenter au registre français "voix mixte" ou au registre italien "voce mista".

La nature de ces transitions entre registres reste, encore aujourd'hui, sujet à controverse dans la communauté scientifique. Nous pouvons rappeler ici les réflexions menées au début des années 1980 à l'initiative du Collegium Medicorum Theatri (CoMeT), une organisation

internationale constituée de cliniciens et thérapeutes de la voix, de scientifiques, de professeurs de chant (Hollien, 1983). Les discussions ont abouti aux points d'accord suivants :

1. **Les registres existent** dans la voix parlée comme dans la voix chantée. Ils doivent être reconnu comme une “entité”. Leurs effets acoustiques perceptibles peuvent être atténués par un entraînement vocal approprié, selon le choix esthétique et stylistique.
2. **Les registres en voix parlée et en voix chantée** sont des entités différentes et séparées, et ils doivent donc être traités comme tel. Leurs fonctions peuvent éventuellement se recouvrir, et ils ont probablement des racines physiologiques communes au niveau laryngé.
3. **L'élimination des registres** : Si certaines formes d'expressions chantées comme le chant savant occidental de l'adulte cherchent à atténuer et lisser les effets acoustiques des registres vocaux, d'autres formes d'expressions chantées les intègrent à part entière. Il est donc important de garder à l'esprit que les registres vocaux ne peuvent pas être éliminés puisqu'ils sont des entités physiologiques inhérentes à l'instrument vocal.
4. **La source des registres vocaux** a donné lieu à de nombreux débats. Deux sources sont principalement reconnues par tous : le larynx et le conduit vocal. Une “minorité substantielle” considère que la source d'un registre vocal est uniquement laryngée, et que les autres phénomènes acoustiques associés aux registres ne proviennent que d'ajustements de timbre.
5. **La dénomination des registres** a également donné lieu à de nombreuses discussions. Il existe un souhait partagé de s'extraire de termes “anciens” et très connotés comme “poitrine” et “tête”. Deux suggestions ont été retenues dans le rapport. La première suggestion est de numéroter les registres du plus grave au plus aigu. Le registre retrouvé en milieu de tessiture sous les termes “tête”, “mid”, “middle”, “upper” reste néanmoins à part. La seconde suggestion est de proposer de nouveaux termes, génériques, qui soient clairs et faciles à comprendre tels que les paires “lourd/léger” ou “bas/haut”.

Un effort scientifique conséquent a été fait depuis les années 1960 pour comprendre les propriétés acoustiques, mécaniques et physiologiques des registres vocaux. Nous pouvons citer ici les travaux du physicien Janwillem Van den Berg (1960, 1963) qui a exploré sur larynx humain excisé les patterns vibratoires des plis vocaux et l'influence de la résonance sous-glottique, ou ceux du clinicien Minoru Hirano qui a exploré le rôle des muscles laryngés intrinsèques par électromyographie (1970) et la structure anatomique multi-couche des plis vocaux (1982, 1988).

Depuis les travaux du phonéticien Harry Hollien (1974), la communauté “parole” s'accorde sur l'existence de trois registres en lien avec des ajustements laryngés spécifiques : “pulse” ou “vocal fry” dans l'extrême grave de la voix humaine, “modal” ou “poitrine” du grave au médium, “falsetto” dans l'aigu. En voix chantée, la définition, le nombre et la dénomination des registres restent sujets à débat. En effet, les registres vocaux sont une réalité acoustique et perceptive pour les chanteurs qui ne peut pas être ignorée. Pour certains auteurs, les registres en voix chantée sont définis par leurs propriétés mécaniques laryngées (Roubeau et Castellengo, 1993 ; Sakakibara, 2003), suivant en cela les travaux précurseurs de Garcia, Benhke ou Hollien. Pour d'autres auteurs, un registre vocal se définit par une qualité vocale spécifique (Titze, 1994 ; Miller, 2000). Le verrou scientifique, pointé par Miller dans sa thèse (2000), est d'identifier les mécanismes physiologiques impliqués dans la production de voix chantée. Dans nos travaux de recherche,

nous nous sommes appuyés sur la notion de mécanismes laryngés mis en évidence par Roubeau et ses collaborateurs dans ses travaux de thèse (1993).

Publications et communications associées :

- Henrich N. (2005) Mirroring the voice from Garcia to the present day : Some insights into singing voice registers, 6th Pan European Voice Conference, London, England, Sept. 2005. Published in Logopedics Phoniatrics Vocology [keynote lecture]
- Henrich N. (2006) Evolution des registres vocaux depuis Garcia, Conférence dans le cycle Sciences et Techniques "Histoire des sons" de l'Université Ouverte de Lyon, Décembre 2006
- Henrich N. (2007) The singing voice registers : physiology, acoustics, and perceptual exploration, V Int. Phoniatrics and Logopaedic Course "The Artistic Voice", 18-21 Oct. 2007, Ravenna, Italy [invited lecture]
- Henrich N. (2006) Mirroring the voice from Garcia to the present day : Some insights into singing voice registers, Logopedics Phoniatrics Vocology, vol. 31, pp. 3-14.
Henrich Bernardoni N. (2014) Assessing the laryngeal nature of singing-voice registers : an overview, 2nd NYU International Symposium "Voice source characteristics : methods and discoveries", New York, USA. [invited lecture]

3.1.2 Les mécanismes laryngés chez l'adulte

Le pli vocal est une structure multicouche complexe, hétérogène et anisotrope. La couche profonde du pli vocal est constituée des fibres musculaires du chef interne du muscle thyro-aryténoïdien. La couche moyenne ou lamina propria se compose d'un tissu conjonctif sous-muqueux, constitué de fibres collagènes dans la partie profonde, de fibres élastiques dans la partie intermédiaire, et d'une substance amorphe et lâche peu fibreuse dans la partie superficielle. Le pli vocal est recouvert d'une couche superficielle muqueuse, l'épithélium. Cette structure multicouche permet un ajustement des contraintes de longueur, de raideur et d'épaisseur dans l'usage du vibrateur laryngé. Quatre mécanismes laryngés caractérisent la production de la voix chez l'adulte, noté M0, M1, M2 et M3. En voix parlée et chantée, l'homme et la femme utilisent principalement les mécanismes laryngés M1 et M2. Les mécanismes M0 et M3 sont utilisés de façon moins systématique pour la production des sons vocaux les plus graves (perçus comme impulsionnels) et des sons les plus aigus de la voix humaine (perçus comme un sifflet). Les mécanismes M1 et M2 se distinguent par la participation ou non de la couche profonde du pli vocal (muscle vocal) à la masse vibrante en action. Cela se traduit par une vibration des plis vocaux sur l'épaisseur en M1, induisant une différence de phase dans l'ouverture verticale des plis. La transition en M2 implique un découplage des structures internes du pli au moment de la transition entre mécanismes, et une vibration dans le plan glottique avec des plis plus allongés et moins épais qu'en mécanisme M1. Ces deux types de vibration sont illustrés sur la Figure 3.2.

Publications et communications associées :

- Roubeau B., Henrich N., Castellengo M. (2009) Laryngeal vibratory mechanisms : the notion of vocal register revisited, Journal of Voice, Volume 23, Issue 4, July 2009, pp. 425-438.
- Henrich N., Roubeau B. (2011) Physiologie laryngée de la voix féminine, Médecine des Arts 69-70 Numéro spécial "la Femme et la Musique" 2011 1-4
- Henrich N. (2012) Physiologie de la voix chantée : vibrations laryngées et adaptations phono-résonantielles, Dans La voix parlée et la voix chantée - 40^e Entretiens de Médecine physique et de réadaptation, Montpellier, France.

3.1.3 Identification des mécanismes laryngés par électroglottographie

La caractérisation du mécanisme laryngé utilisé dans une production vocale donnée reste encore à l'heure actuelle un défi scientifique et technique.

Des processus d'identification ont été proposés, qui s'appuient sur l'électroglottographie. Puisqu'une différence majeure entre les mécanismes M1 et M2 concerne le contact sur l'épaisseur des plis vocaux, l'électroglottographie semble une technique adaptée et prometteuse, qui s'applique en phonation et de façon non-invasive. Les travaux de Bernard Roubeau et de ses collaborateurs avaient montré la variation d'amplitude du contact glottique mesuré par électroglottographie au moment des transitions entre mécanismes laryngés. Les travaux de thèse en collaboration avec ces chercheurs ont montré, de façon complémentaire, la variation dans la vitesse du contact glottique mesurée par la dérivée du signal électroglottographique au passage entre mécanismes laryngés M1 et M2, et l'impact des mécanismes laryngés sur le quotient ouvert, rapport entre la durée d'ouverture glottique et la durée totale d'un cycle vibratoire (Henrich et al., 2004 - voir l'illustration sur la Figure 3.3). La mesure du quotient ouvert OQ , ou de son équivalent le quotient de contact glottique $CQ = 1 - OQ$, permet donc d'aider à l'identification du mécanisme laryngé utilisé en phonation. Si en M1, le quotient ouvert peut varier dans une large gamme de valeur (0.3 – 0.7), en M2 il est toujours supérieur à 0.5, c'est à dire que la durée d'ouverture d'un cycle glottique excède toujours 50% de la durée du cycle (Henrich et al., 2005).

Publications et communications associées :

- Henrich N., Roubeau B. and Castellengo M. (2003) On the use of electroglottography for characterisation of the laryngeal mechanisms, In proc. Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC 03), Stockholm, Sweden, Aug. 2003.
- Henrich N. , d'Alessandro C. , Castellengo M. and Doval B. (2004) On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of nonpathological phonation, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 115 (3), pp. 1321-1332.
- Henrich N. , d'Alessandro C. , Castellengo M. and Doval B. (2005) Glottal open quotient in singing : Measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity, and fundamental frequency, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 117 (3), pp. 1417-1430.
- Roubeau B., Henrich N., Castellengo M. (2009) Laryngeal vibratory mechanisms : the notion of vocal register revisited, Journal of Voice, Volume 23, Issue 4, July 2009, pp. 425-438.

3.2 Exploration du comportement physiologique laryngé pour diverses expressions vocales

3.2.1 La voix mixte

Le registre de *voix mixte* mentionné en Section 3.1.1 questionne encore les scientifiques et pédagogues de la voix à l'heure actuelle. Son origine physiologique, et en particulier sa nature laryngée, reste source de nombreuses croyances et spéculations dans le monde de la pratique vocale. Ce registre se retrouve dans le chant classique, mais également dans les musiques amplifiées actuelles. Il est utilisé pour permettre le maintien d'une homogénéité de timbre sur l'ensemble de la tessiture du chanteur ou de la chanteuse.

Une première étude menée sur cinq chanteurs professionnels (Castellengo et al., 2004) a permis de montrer que ce registre est produit par l'utilisation de l'un ou l'autre des deux principaux mécanismes laryngés M1 et M2 de la voix humaine, selon la catégorie vocale et le choix esthétique du chanteur. La Figure 3.4 illustre un exemple dans le cas d'un contre-ténor chantant un son tenu alternativement en registre de *poitrine* ou en registre de *voix mixte*. Une étude plus approfondie menée sur deux chanteurs professionnels (un contre-ténor et une soprano) a confirmé ces observations. Elle a permis d'expliquer comment les chanteurs gèrent leur tessiture par rapport à la voix mixte (Lamesch et al., 2007 ; Castellengo et al., 2007). Ainsi que l'illustre la Figure 3.5, nous pouvons distinguer deux types de production en voix mixte : la première (mixte 1) utilise le

mécanisme laryngé M1, et la seconde (mixte 2) utilise le mécanisme laryngé M2. La voix mixte en M1 est produite dans le haut de la tessiture correspondant à ce mécanisme et à des intensités piano à mezzo-forte, avec diminution de l'énergie spectrale dans les hautes fréquences. La voix mixte en M2 est produite dans le bas de la tessiture correspondant à ce mécanisme et à des intensités mezzo-piano à forte, avec un enrichissement du timbre. Les stratégies résonantielles mises en place par ces chanteurs restent encore à explorer.

Publications et communications associées :

- Castellengo M., Chuberre B. and Henrich N. (2004) Is voix mixte, the vocal technique used to smoothe the transition across the two main laryngeal mechanisms, an independent mechanism ?, ISMA, Nara, Japan, April. 2004.
- Lamesch S., Expert R., Castellengo M., Henrich N., Chuberre B. (2007) Investigating voix mixte : A scientific challenge towards a renewed vocal pedagogy, 3rd Conference on Interdisciplinary Musicology, Tallinn, Estonia, Aug. 2007.
- Castellengo M., Lamesch S., Henrich N. (2007) Vocal Registers and Laryngeal Mechanisms, a case study : The French "Voix Mixte" , 19th International Congress on Acoustics, Madrid, Spain, Sept. 2007.

3.2.2 La voix chantée de l'enfant pré-pubère

Si l'adulte homme ou femme dispose de quatre mécanismes laryngés pour produire des sons vocaux du plus grave au plus aigu (M0, M1, M2, M3), qu'en est-il pour l'enfant pré-pubère, c'est-à-dire l'enfant dont la voix n'a pas encore muée ? Cette question est loin d'être résolue, elle reste un sujet de controverse dans la littérature. Certains auteurs ne considèrent qu'un registre vocal chez l'enfant prépubère, le *registre de tête* ou *mécanisme léger*. D'autres auteurs considèrent que les enfants pré-pubères utilisent plusieurs registres vocaux avant la mue. Une voix grave chez un enfant pré-pubère est le plus souvent considérée comme un signe de pathologie vocale. Ce sont des enfants qui chantent faux, dans une tonalité plus grave que celle attendue, avec un faible ambitus vocal, ou avec un fondamental grave. Ces enfants sont surnommés les *enfants bourdons*. Par une enquête auprès de deux populations (thérapeutes de la voix d'un côté, professeurs de chant de l'autre), nous avons cherché à savoir ce qu'il en était des connaissances partagées en France sur la voix de l'enfant pré-pubère. Nous avons également mené une étude exploratoire de la production de voix chantée et de l'usage des mécanismes laryngés sur 71 enfants âgés de 8 à 10 ans. Ces travaux ont été menés dans le cadre d'un mémoire d'orthophonie (Anne Courbis et Stéphanie Montérymard, 2013-2014) en co-direction avec Jocelyne Sarfati, ORL Phoniatre sur Grenoble.

L'enquête menée sur les deux types de population a confirmé la controverse au niveau des connaissances partagées sur la voix de l'enfant. De façon générale, les notions de mécanismes laryngés en voix humaine sont peu connues des cliniciens et pédagogues du chant. C'est d'autant plus marqué quand on les questionne sur la voix de l'enfant. Le nombre de mécanismes ou de registres mentionnés est très variable, et rares sont les praticiens ou pédagogues qui font référence à 4 registres ou mécanismes disponibles chez l'enfant pré-pubère. L'étude acoustique menée sur la population d'enfants montre que près de la moitié ont à disposition le mécanisme M1, même s'ils n'en font pas un usage en voix parlée et chantée usuellement. La plupart des enfants possèdent les mécanismes M0 (pour produire des sons très graves) et M3 (pour produire des sons très aigus). Aucun lien n'a été montré entre le degré de dysphonie de la voix de l'enfant et la fréquence fondamentale moyenne.

Publications et communications associées :

- Courbis A., Montérymard S. (2014) La voix de l'enfant prépubère de 8 à 10 ans : étendue vocale et mécanismes laryngés. Mémoire d'Orthophonie de l'Université Claude Bernard Lyon1, Juin 2014.
- Courbis A., Montérymard S., Sarfati J., Henrich Bernardoni N. (2014) La voix de l'enfant prépubère de 8 à 10 ans : étendue vocale et mécanismes laryngés. Congrès Français de Phoniatrie, Oct 2014, Paris, France

3.2.3 La voix de sifflet

La *voix de sifflet*, ou registre de sifflet, permet de produire les sons les plus aigus de la voix humaine. Dans le cadre d'une exploration de l'aigu de la voix de soprane dont nous reparlerons dans le chapitre 4, nous avons porté notre attention sur ce registre vocal peu décrit dans la littérature. Ce travail a été mené en collaboration avec Maëva Garnier, Joe Wolfe et John Smith (UNSW, Sydney, Australie). Dans l'aigu de leur tessiture, vers 600 Hz (Ré4-Mi4), les sopranes présentent une zone de « passage », encore appelée « *secondo passaggio* » dans la pédagogie du chant. Selon leur degré d'expertise, les chanteuses peuvent présenter des difficultés voire une incapacité à produire des sons dans cette zone de fréquence et au-delà. Ces difficultés se traduisent par une instabilité vocale, une modification de timbre et d'intensité. Les raisons de ces difficultés ne sont actuellement pas comprises. Une étude a donc été menée pour explorer les stratégies phonatoires et articulatoires des chanteuses dans l'aigu. Les productions vocales de douze chanteuses de niveau amateur à professionnel ont été étudiées du La3 (440 Hz) jusqu'au maximum de leur tessiture respective. En parallèle de la mesure des fréquences de résonance, les signaux acoustiques et électroglottographiques des chanteuses ont été enregistrés sur des notes tenues, des glissandos, et pour quatre chanteuses, deux qualités vocales différentes (*full head* - pleine tête, et *fluty resonant* - résonance de flûte). Une étude endoscopique par cinématographie ultra-rapide a également été menée sur une des chanteuses en collaboration avec le Dr. Lise Crevier Buchman et Coralie Vincent à l'Hôpital Européen Georges Pompidou à Paris.

Concernant le comportement vibratoire laryngé, une unique transition laryngée est observée sur les glissandi au-dessus de la zone du premier passage (*primo-passaggio*) qui correspond à la zone de transition entre les mécanismes laryngés M1 et M2. Cette observation soutient l'hypothèse de deux mécanismes laryngés distincts dans la partie aigue de la voix de soprane, les mécanismes M2 et M3 dans lesquels sont produits respectivement la voix de tête chez la femme et la voix de sifflet. La transition laryngée n'est pas abrupte, mais intervient graduellement sur plusieurs tons dans l'intervalle de hauteurs Ré#4-Ré5. Les chanteuses professionnelles présentent cette transition dans une étendue fréquentielle plus aiguë et plus réduite que les chanteuses amateurs. Des sauts de fréquence ou des phénomènes d'instabilités se retrouvent dans la partie aigue de la zone de transition. Ils ne coïncident pas avec la limite supérieure de l'ajustement résonantiel [$R1 : f_0$] observé chez ces chanteuses, contrairement aux hypothèses formulées dans la littérature. Néanmoins, les ajustements résonantiels peuvent générer des sauts de fréquence dans l'aigu qui ne sont pas liés à la transition laryngée observée. Les deux qualités vocales produites par quatre des chanteuses (*full head* et *fluty resonant*) sont produites dans deux mécanismes laryngés différents : *full head* en M2 et *fluty resonant* en M3. Des sauts de fréquence, ainsi que des discontinuités dans le comportement glottique et les propriétés spectrales, ont été mis en évidence sur les decrescendi produits dans la zone de recouvrement de ces deux qualités vocales.

Publications et communications associées :

- Garnier M., Henrich N., Crevier-Buchman L., Vincent C., Smith J., Wolfe J. (2012) Glottal behavior in the high soprano range and the transition to the whistle register, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 131 (1), pp. 951-962.

3.3 Vibration des plis vestibulaires

Nous avons détaillé jusqu'à présent l'implication des plis vocaux dans la production vocale humaine. Nous avons d'autres membranes au sein du larynx, comme les plis vestibulaires ou les membranes ary-épiglottiques, dont le rôle fonctionnelle dans la parole et dans le chant est souvent négligé. Nous nous sommes intéressés aux plis vestibulaires à la suite du questionnement de l'ethnomusicologue Bernard Lortat-Jacob sur la technique vocale du *Bassu* dans le chant polyphonique sarde *A Tenore*. Notre compréhension de rôle fonctionnel des plis vestibulaires s'est développé ensuite grâce aux travaux de thèse de Lucie Bailly menés en co-direction avec Xavier Pelorson et Joël Gilbert (Bailly, 2009).

Encore appelées bandes ventriculaires ou “fausses cordes vocales”, les plis vestibulaires sont situés au-dessus du plan glottique et séparés des plis vocaux par les vestibules de Morgagni. Leurs propriétés biomécaniques se différencient nettement de celles des plis vocaux par une plus grande viscosité et une plus faible raideur. Dans les modèles actuels de production de la parole et du chant, les plis vestibulaires sont très rarement pris en compte. Pourtant, leur présence et leur rapprochement peuvent avoir des conséquences aérodynamiques sur l'écoulement d'air laryngé, ainsi que nous le verrons dans le Chapitre 5. Pour comprendre l'implication de ces structures laryngées supra-glottiques dans la production vocale humaine parlée et chantée, deux bases de données ont été constituées, l'une à l'University Hospital Eppendorf de Hambourg (Allemagne, équipe du Pr. Hess) et l'autre à l'Hôpital Européen Georges Pompidou (Paris, Dr. Lise Crevier-Buchman). Elles comprennent l'enregistrement par cinématographie ultra-rapide de 5 locuteurs et 4 chanteurs lors de divers gestes phonatoires pouvant potentiellement impliquer les plis vestibulaires, tels que des cris, des grognements, du chant, du yodel, du rire. Ces acquisitions endoscopiques sont complétées par l'enregistrement simultané des signaux audio et électroglottographique pour chaque production.

3.3.1 Caractérisation de la vibration vestibulaire dans le chant Sarde du Bassu

Le *Bassu* est le nom donné au chanteur ayant la voix la plus grave dans le quatuor polyphonique traditionnel *A Tenore* de Sardaigne. Le Bassu produit un son pour lequel la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux est située entre 140 et 240 Hz et dont l'oreille humaine perçoit l'octave inférieure (entre 70 et 120 Hz). Nous avons montré que cette production vocale s'accompagne d'un phénomène de doublement de période, qui explique la perception d'un son produit une octave en-dessous de la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux (Henrich et al., 2006). Le phénomène de doublement de période se traduit sur le signal électroglottographique dérivé (DEGG) par une variation systématique de l'amplitude du pic de fermeture glottique toutes les deux cycles glottiques. Cela suggère la répétition périodique d'une fermeture abrupte et d'une fermeture moins abrupte. L'observation par cinématographie ultra-rapide a montré le rapprochement et la mise en vibration des plis vestibulaires pour ce type de phonation. Des analyses menées sur les images obtenues par cinématographie ultra-rapide combinées à l'électroglottographie ont permis de décrire précisément le mouvement vibratoire des plis vestibulaires dans son interaction avec celui des plis vocaux (Bailly et al., 2007a). Le rapprochement vestibulaire suit l'ouverture glottique, avec une mise en contact tous les deux cycles. Les plis vocaux restent écartés pendant une partie du contact vestibulaire et leur fermeture précède l'ouverture des plis vestibulaires. L'altération de l'amplitude des pics DEGG à la fermeture glottique observée pendant les phases de contact vestibulaire suggère que la vitesse

du contact glottique diminue de façon notable sous l'influence de la constriction vestibulaire. La durée du cycle glottique augmente également quand les plis vestibulaires sont en contact. La hauteur du son perçu correspond à la fréquence fondamentale de vibration vestibulaire, et non plus à la fréquence du cycle glottique.

Publications et communications associées :

- Henrich N., Lortat-Jacob B., Castellengo M., Bailly L. and Pelorson X. (2006) Period-doubling occurrences in singing : the "bassu" case in traditional Sardinian "A Tenore" singing, in International Conference on Voice Physiology and Biomechanics, Tokyo, Japan, Jul. 2006.
- Bailly L., Henrich N., Webb M., Müller F., Licht A.-K., Hess M. (2007a) Exploration of vocal-folds and ventricular-bands interaction in singing using high-speed cinematography and electroglottography, 19th International Congress on Acoustics, Madrid, Spain, Sept. 2007.
- Bailly L., Henrich N., Pelorson X. (2007b) Exploration conjointe sur l'humain («in vivo») et sur maquette («in vitro») de l'interaction entre les cordes vocales et les bandes ventriculaires, Actes des 7èmes RJC Parole, Paris, Jul. 2007.
- Bailly L., Henrich N., Pelorson X. (2010) Vocal fold and ventricular fold vibration in period-doubling phonation : Physiological description and aerodynamic modeling, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 127(5), pp. 3212-3222.

3.3.2 Implication des plis vestibulaires dans l'effort vocal

Dans tout geste d'effort vocal, un rapprochement des plis vestibulaires est mis en évidence. Ce rapprochement peut s'accompagner d'une augmentation conjointe de l'énergie acoustique dans la bande de fréquence $2 - 4k Hz$, sans influence directe sur l'intensité vocale globale (Bailly et Henrich, 2010). Le geste phonatoire de rapprochement peut aboutir à un accollement des plis vestibulaires, observé sur la partie médiane ou antéro-médiane dans le cas d'un accollement partiel, ou sur l'intégralité de la longueur des plis dans le cas d'un accollement complet. Il peut s'accompagner d'une mise en vibration des bords libres des plis vestibulaires, avec ou sans accollement. Cette vibration des plis vestibulaires peut être périodique ou non selon les cas. Elle est observée de façon systématique dans les grognements. Elle impacte la vibration vocale de façon aérodynamique, ainsi que le montrent les simulations qui permettent de reproduire les phénomènes vibratoires observés sur les signaux électroglottographiques.

Publications et communications associées :

- Bailly L., Henrich N. (2010) « Contribution des bandes ventriculaires lors d'un effort vocal. Impact sur la vibration glottique », 10ième Congrès Français d'Acoustique, Lyon, Avril 2010.
- Bailly L., Henrich N. (2010) How do ventricular folds behave during vocal effort ?, 9th International Conference Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research, Erlangen, Germany, 10-11 Sept. 2010.
- Bailly L., Henrich Bernardoni N., Müller F., Rohlf A.-K., Hess M. (2014) The ventricular-fold dynamics in human phonation. J Speech Lang Hear Res, vol.57, pp. 1219-1242.

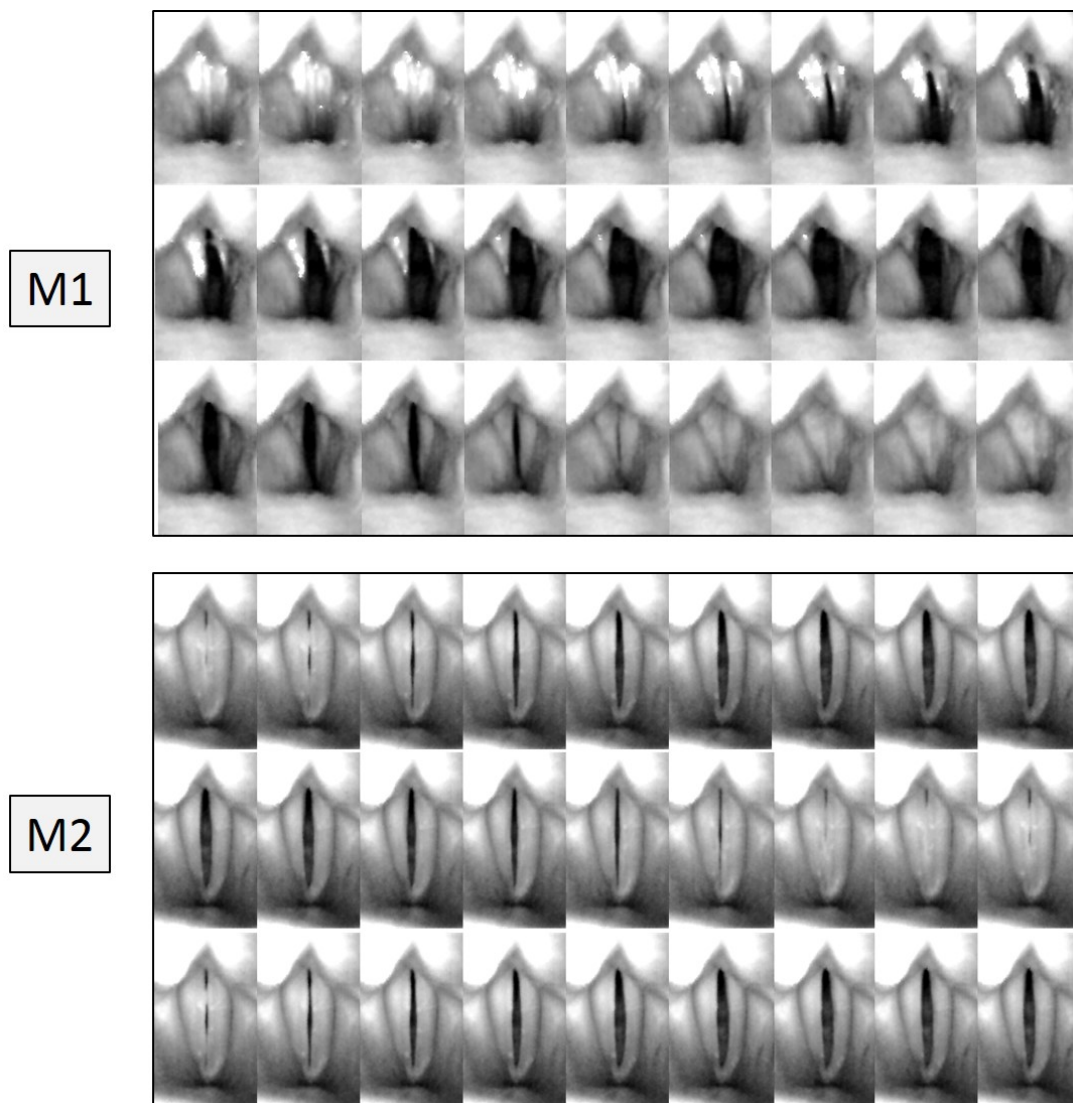


FIGURE 3.2 – Visualisation du cycle vibratoire glottique en M1 et en M2 pour un même locuteur. Chaque séquence a une durée de 6.75ms (caméra à 4000 images/s). D'après Henrich, 2012

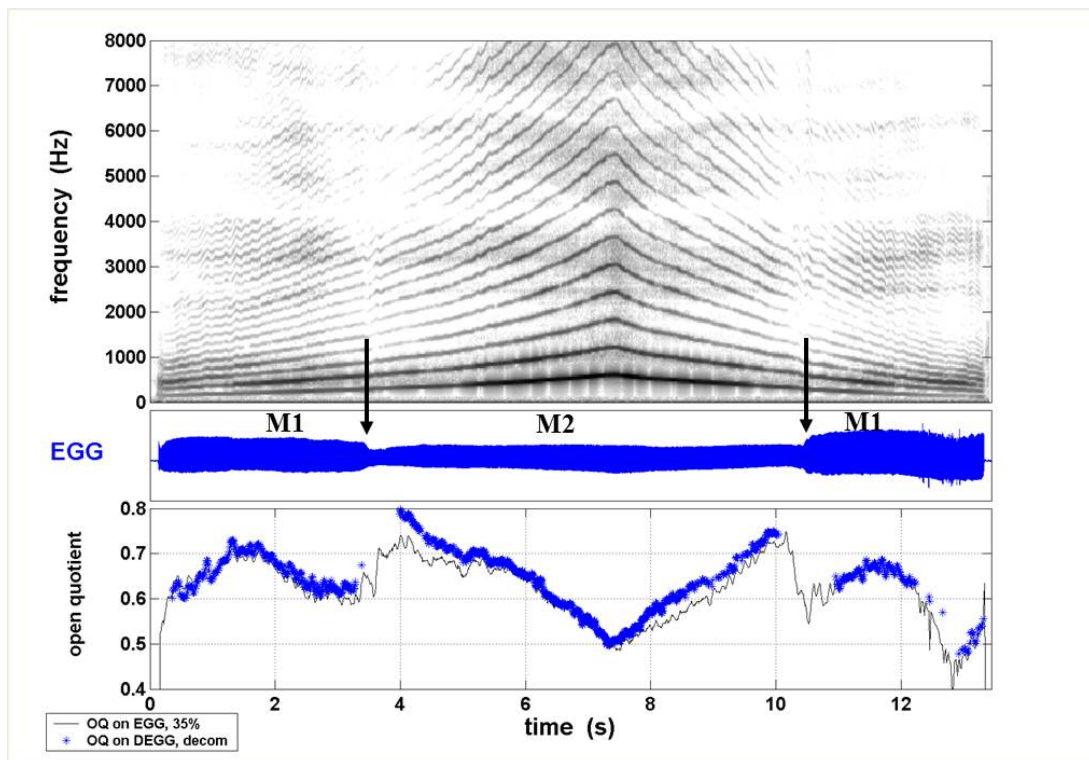


FIGURE 3.3 – *Glissando ascendant-descendant avec transitions de mécanismes laryngés associées à un changement d'amplitude du contact glottique (EGG) et une variation de quotient ouvert. D'après Henrich, 2001*

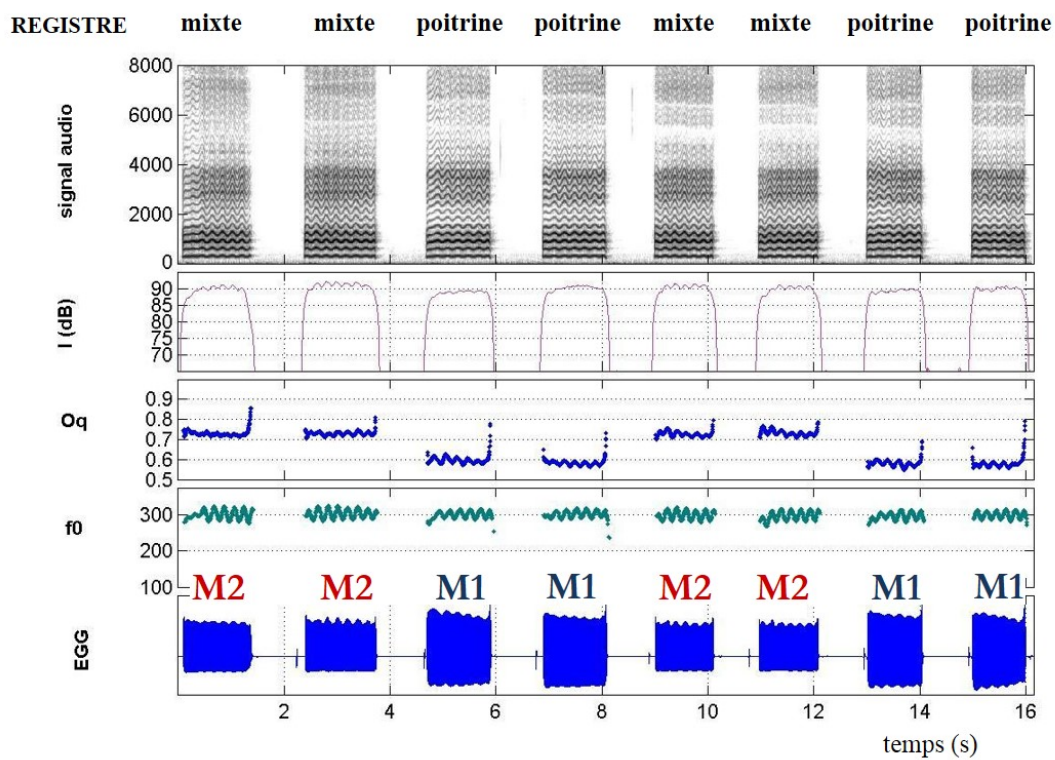


FIGURE 3.4 – Exploration du comportement laryngé et de l'intensité vocale pour une série de sons chantés alternativement en registre de poitrine ou en registre de voix mixte par un contre-ténor. Les mécanismes laryngés identifiés sont notés M1/M2.

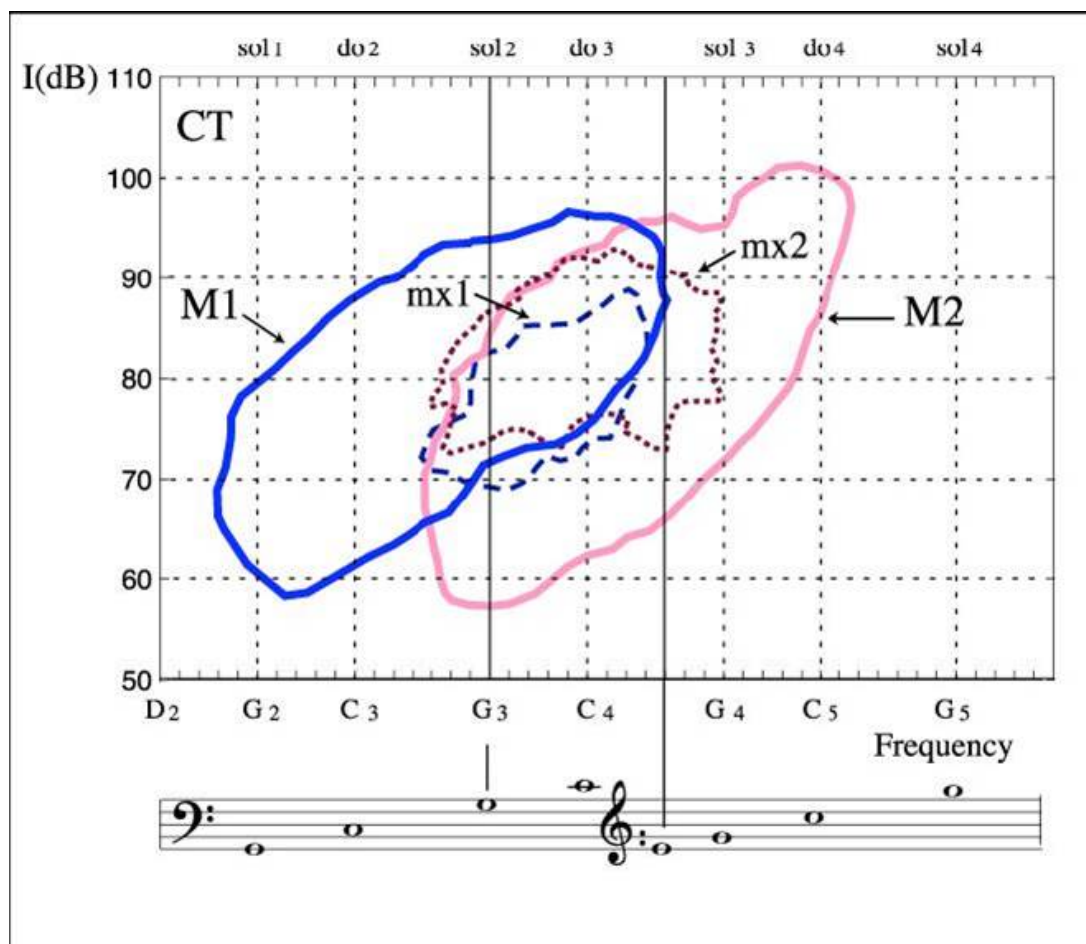


FIGURE 3.5 – Positionnement de la production en registre de voix mixte d'un contre-ténor sur son phonétogramme par mécanismes laryngés. La voix mixte de poitrine et la voix mixte de tête distinguées par le chanteur sont respectivement notées *mx1* et *mx2*. D'après Castellengo et al., 2007

Stratégies d’ajustement résonantiel

Si la source glottique contribue pour beaucoup à la qualité vocale d’un son produit, elle ne permet pas à l’humain de s’exprimer de façon intelligible dans la parole et dans le chant. Le son produit par les vibrations laryngées doit être modelé par l’action des articulateurs dans le conduit vocal pour produire des unités sonores qui feront sens pour l’auditeur.

Dans la parole, le comportement articulatoire du locuteur est bien souvent étudié et modélisé de façon dissociée du comportement glottique. Dans ces recherches, nous avons souhaité observer les comportements phonatoires et articulatoires conjointement. Les travaux présentés dans ce chapitre montrent que les résonances physiques du conduit vocal peuvent se produire à des fréquences très proches des premiers harmoniques de la source glottique en voix chantée. Nous avons étudié pour cela les stratégies d’ajustement résonantiel dans le chant lyrique et dans la voix Bulgare féminine.

4.1 Les résonances dans le chant lyrique

Pour mesurer les propriétés de résonance acoustique du conduit vocal sans faire d’hypothèse à priori sur la source glottique, nous avons choisi de nous appuyer sur une méthode innovante et prometteuse développée par une équipe australienne (Pr Wolfe et Pr Smith à l’UNSW, voir Section 2.4). Cette technique de mesure directe de l’impédance acoustique d’un conduit, développée tout d’abord pour l’étude des instruments de musique (Wolfe et al., 2001), avait alors été appliquée avec succès à l’étude formantique des voyelles dans la parole (Epps et al., 1997; Dowd et al., 1998) et dans le chant (Joliveau et al., 2004). Nous avons débuté une collaboration active avec cette équipe dès 2004, et reçu le soutien d’un financement PHC franco-australien pour les échanges scientifiques et technologiques (FAST, 2010-2011). Les stratégies d’ajustement résonantiel mises en place par les chanteurs lyriques ont été étudiées en fonction de la hauteur fondamentale, de l’intensité vocale et de la voyelle chantée. Plusieurs grandes bases de données ont été constituées :

1. **en 2004** : 22 chanteurs, de niveau amateur à professionnel (4 barytons, 8 ténors, 4 altos et 6 sopranos) [base LYR2004]
2. **en 2005** : 14 chanteurs professionnels, pour la plupart de l’Opéra de Sydney (2 barytons, 7 ténors, 5 sopranos) [base LYR2005]
3. **en 2008** : 12 chanteuses de niveau amateur à professionnel (enregistrées par Maëva Garnier) [base LYR2008]

4. **en 2010** : 3 chanteurs professionnels renommés, maîtrisant la technique du yodel [base YOD2010]

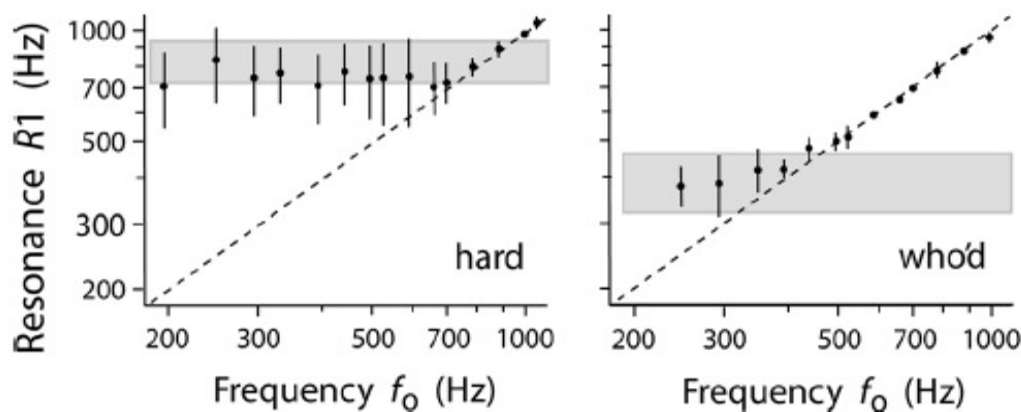


FIGURE 4.1 – Evolution de la fréquence de la première résonance en fonction de la hauteur de la note chantée pour les voyelles /a/-hard et /u/-who’d (valeur moyenne et écart-type pour les 10 chanteuses (altos et sopranos) de la base LYR2004). La ligne diagonale en pointillée indique l’accord $[R1 : f0]$. La zone grisée représente la valeur de $R1$ mesurée pour ces chanteuses et ces voyelles en voix parlée (\pm écart-type). D’après Henrich et al., 2011.

Les analyses des bases de données LYR2004 et LYR2008 ont mis en évidence différentes stratégies d’ajustement résonantiel dans le chant lyrique, que nous allons résumer ici. Nous avons ainsi observé que les fréquences des deux premières résonances acoustiques du conduit vocal restent relativement constantes sur l’ensemble de la tessiture des chanteurs, tant que la note chantée reste plus grave que la fréquence de la première résonance (Henrich et al., 2011). Ces fréquences de résonance peuvent parfois augmenter en lien avec une augmentation de la fréquence fondamentale, ce qui traduit un mouvement d’ouverture de la mâchoire du chanteur lorsque le chanteur chante plus aigu. Dans les cas où la fréquence de la première résonance $R1$ rejoint celle de la fréquence fondamentale $f0$ (dans l’aigu des tessitures ou pour la voyelle fermée /u/), nous observons un phénomène d’“accrochage” de la résonance à la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux, soit un accord $[R1 : f0]$. La Figure 4.1 illustre le cas des deux voyelles /a/ et /u/. Ce phénomène d’ajustement résonantiel est fréquent chez les sopranos qui chantent à des hauteurs où se rejoignent résonance et harmonique, quel que soit le niveau d’entraînement de la chanteuse. Il se retrouve également dans les autres tessitures. Les altos présentent des accords $[R1 : f0]$ pour les voyelles ayant une première résonance de fréquence basse. Dans la partie grave de leur tessiture, elles peuvent présenter un accord $[R1 : 2f0]$. Les barytons et les ténors peuvent présenter des accords $[R1 : 2f0]$ et $[R1 : 3f0]$ sur une partie de leur tessiture, ou des accords à des harmoniques supérieures dans le grave. Les différences inter-individuelles sont importantes, en particulier pour les voix graves.

L’ajustement de la fréquence de la première résonance au premier harmonique peut éventuellement s’accompagner d’un ajustement de la fréquence de la seconde résonance ($R2$) au second harmonique chez certaines chanteuses (accord $[R2 : 2f0]$). Pour produire les sons les plus aigu, certaines chanteuses étendent la zone d’accord $[R1 : f0]$ jusqu’à 1300–1500 Hz (Mi5-Fa#5). D’autres chanteuses ajustent la fréquence de la seconde résonance près du premier harmonique

($[R2 : f0]$) jusqu'à 2350Hz (Ré6).

Publications et communications associées :

- Henrich, N., Smith, J., Wolfe, J. (2011). Vocal tract resonances in singing : Strategies used by sopranos, altos, tenors, and baritones. J. Acoust. Soc. Amer., vol. 129 (2), pp. 1024-1035.
- Kob M., Henrich N., Herzel H., Howard D., Tokuda I., Wolfe J. (2011) Analysing and Understanding the Singing Voice : Recent Progress and Open Questions, Current Bioinformatics 6(3) pp.1574-8936
- Smith, J., Henrich, N., Garnier, M. and Wolfe, J. (2011) "The acoustics of registers and resonances in singing" Proc. Acoustics 2011, Gold Coast, Australia, D.J. Mee and I.D.M. Hillock, editors.
- Smith J., Wolfe J., Henrich N. and Garnier M. (2013) Diverse resonance tuning strategies for women singers, in Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference 2013, SMAC 13, edited by Roberto Bresin and Anders Askenfeldt (Stockholm, Sweden) p. 306-310
- Henrich Bernardoni N., Smith J., Wolfe J. (2014) Vocal tract resonances in singing : variation with laryngeal mechanism for male operatic singers in chest and falsetto registers. J. Acoust. Soc. Amer., vol. 135 (1), pp. 491-501.

4.2 Chant bulgare féminin

Si des chanteurs lyriques présentent ponctuellement un ajustement de la résonance $R1$ au second harmonique $H_2 = 2f_0$, l'accord $[R1 : 2f_0]$ peut être une stratégie d'ajustement systématique dans d'autres styles de chant. Ainsi les chants des Balkans, et en particulier le chant traditionnel des femmes Bulgares, sont particulièrement sonores, avec comme caractéristique principale une prédominance de l'énergie acoustique dans le second harmonique de la voix (Messner, 1980 ; Boersma et Kovacic, 2006). En collaboration avec Mara Kiek (ACARMP Sydney Conservatorium of Music, The University of Sydney, Australia), nous avons exploré le comportement vocal d'une chanteuse australienne maîtrisant deux techniques de chant traditionnel bulgare menant à deux qualités vocales distinctes : la qualité "*teshka*", qui signifie *lourd* et qui correspond à une production vocale très sonore, et la qualité "*leka*" (*léger*) pour laquelle la production vocale est plus douce, se rapprochant en timbre du "*registre de la voix de tête*" chez la femme. L'analyse des voyelles chantées dans le style traditionnel bulgare a mis en évidence la recherche d'un accord entre la première résonance $R1$ et l'harmonique le plus proche, soit H_2 ou H_1 selon les voyelles, quelle que soit la technique utilisée (Henrich et al., 2006a). Cette stratégie d'ajustement résonantiel systématique distingue très nettement le comportement vocal en chant bulgare du comportement en chant lyrique pour cette chanteuse. Ainsi que l'illustre la Figure 4.2, les fréquences de résonance des voyelles chantées en voix de tête restent à proximité des fréquences de résonance des voyelles parlées sur la tessiture considérée.

L'analyse des signaux électroglottographiques enregistrés simultanément aux résonances acoustiques a montré que cette chanteuse produisait ces deux techniques dans le même mécanisme laryngé M1 (Henrich et al., 2006b). La différence d'intensité vocale entre ces deux types de phonation ne s'explique pas uniquement par l'ajustement résonantiel, puisque nous avons obtenu des valeurs similaires pour $R1$ entre la qualité vocale "*teshka*" et la qualité "*leka*". La source glottique semble participer à cette différence d'intensité, avec des valeurs de quotient ouvert plus basses en "*teshka*" qu'en "*leka*". Cette étude pilote mériterait d'être élargie à plusieurs chanteuses maîtrisant ces deux techniques de chant bulgare.

Publications et communications associées :

- Henrich N., Kiek M., Smith J. and Wolfe J. (2006a) Resonance strategies used in Bulgarian women's singing style : a pilot study. Logopedics Phoniatrics Vocology, vol. 32 :4, 171 - 177.
- Henrich N., Kiek M., Smith J. and Wolfe J. (2006b) Resonance tuning and glottal behaviour in different

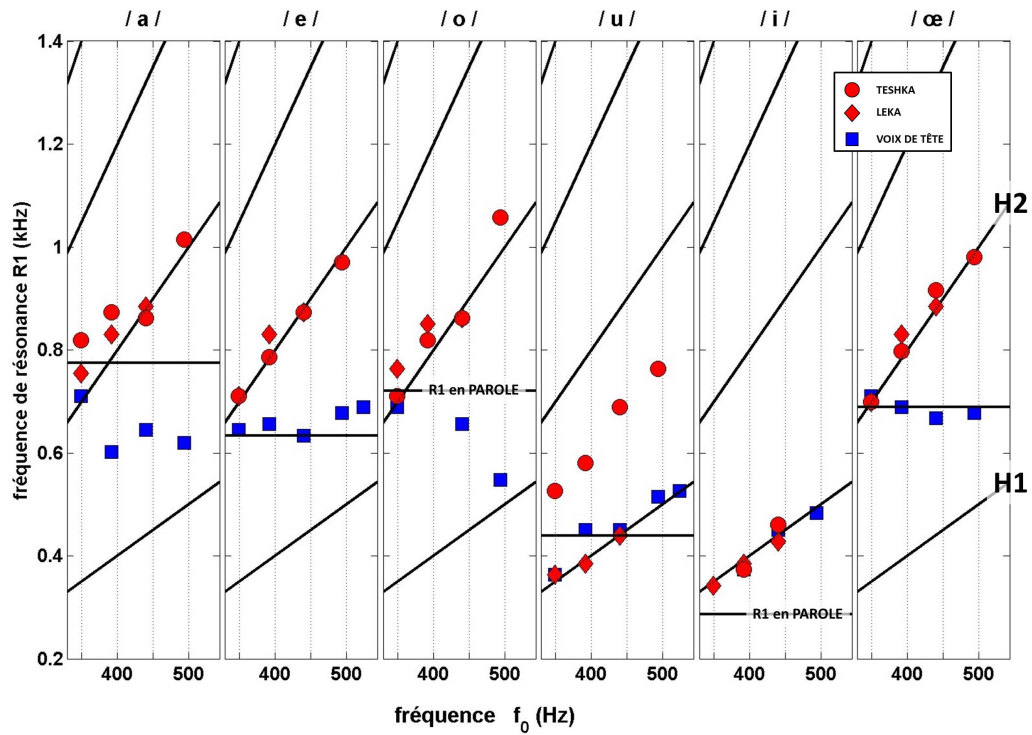


FIGURE 4.2 – Evolution de la fréquence de la première résonance mesurée pour six voyelles du bulgare chantées dans le style traditionnel bulgare - avec deux qualités différentes : “teshka”-lourd et “leka”-léger - et dans le style lyrique - en voix de tête. Les lignes noirs horizontales présentent les valeurs mesurées en voix parlée. Les lignes obliques présentent les rapports harmoniques $R_i = H_n = n f_0$. D’après Henrich, 2014.

vocal qualities in Bulgarian women’s singing. A pilot study, in International Conference on Voice Physiology and Biomechanics, Tokyo, Japan, Jul. 2006.

Interactions pneumo-phono-résonantielles

La compréhension d'un phénomène physique passe par l'élaboration de modèles qui vont essayer de rendre compte de ce phénomène et de le reproduire fidèlement. Comme nous l'avons vu au Chapitre 1, le modèle à la base de la production vocale humaine est un modèle linéaire source-filtre, qui a été exposé par Fant en 1960. La théorie source-filtre s'appuie sur l'hypothèse que les parties « source » et « filtre » peuvent être modélisées indépendamment l'une de l'autre. Cette hypothèse d'indépendance est une approximation qui convient à la modélisation de la parole usuelle, mais qui doit être remise en question dès que l'on s'intéresse aux questions de qualité vocale, à la voix pathologique et au chant. Peu d'études ont été dédiées jusqu'à présent à l'exploration et à la compréhension des phénomènes d'interactions source-filtre. L'objet des recherches présentées dans ce chapitre est de mettre en évidence quelques phénomènes d'interaction entre les gestes respiratoires, les gestes phonatoires et les gestes articulatoires. Nous discuterons du contrôle de la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux, de l'influence de constriction dans le conduit vocal - à proximité des plis vocaux ou aux lèvres - sur le comportement glottique (influence du filtre sur la source), et également de l'impact des conditions aux limites à la source sur la fonction de transfert du conduit vocal (influence de la source sur le filtre).

5.1 Etude du contrôle aérodynamique et biomécanique de la fréquence fondamentale, entre pression sous-glottique et tension laryngée

Dans la littérature, le contrôle de la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux (f_0) est considéré, et souvent modélisé, uniquement du point de vue de la mécanique du vibreur laryngé. Le contrôle aérodynamique de f_0 n'est pas toujours pris en compte. Etudier ces contrôles sur l'humain est impossible, car le sujet est en perpétuel adaptation dans un contrôle global du geste phonatoire. Nous avons donc choisi une approche qui nous permette d'étudier ce contrôle dans des conditions physiologiques aussi réalistes que possible, à partir de pièces anatomiques (larynx humains excisés). Un banc larynx, hybride au sens qu'il comprend des pièces mécaniques et des pièces anatomiques, a été mis en place au Laboratoire d'Anatomie des Alpes Françaises, en partenariat avec le CHU La Timone à Marseille et le LPL à Aix-en-Provence. Il est présenté en Figure 5.1. Il a permis de comparer l'impact sur les capacités phonatoires de larynx humains excisés d'un contrôle mécanique des plis vocaux - par mise en tension des plis vocaux

par adduction et étirement- et d'un contrôle aérodynamique de la pression d'air en entrée du système. Douze larynx (6 larynx de femmes, 6 larynx d'hommes) ont été testés dans le cadre de la thèse de doctorat de Noel Hanna (Hanna, 2014). Seuls huit larynx sur les douze se sont mis en auto-oscillation dans les conditions expérimentales et ont permis d'effectuer des mesures.

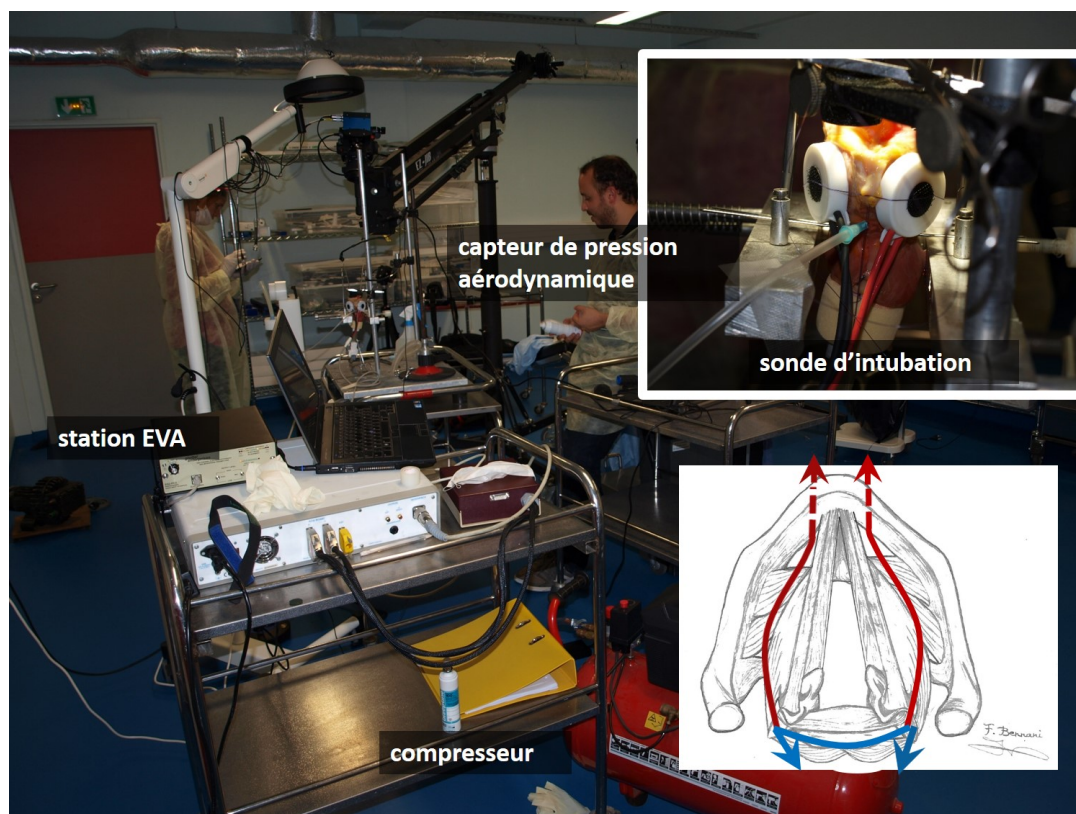


FIGURE 5.1 – Illustration du banc larynx hybride au LADAF. L'adduction des plis vocaux se fait par traction sur des fils de suture insérés au niveau des insertions musculaires des cartilages aryténoïdes. Ces tractions reproduisent l'action de contraction des muscles inter-aryténoïdiens et des muscles crico-aryténoïdiens latéraux. Ils induisent un mouvement d'adduction et d'élongation des plis vocaux. Le contact entre les plis est mesuré par électroglottographie. La pression sous-glottique est mesurée à partir du capteur de pression aérodynamique de la station EVA2.

Pour ces larynx, une même gamme de f_0 est obtenue par un contrôle aérodynamique ou par un contrôle mécanique, ainsi que l'illustrent les Figures 5.2 et 5.3. Sur pièce anatomique, une augmentation de pression sous-glottique permet, tout aussi bien que l'ajustement mécanique des plis vocaux, de contrôler leur fréquence fondamentale de vibration. Des comportements dynamiques non-linéaires (saut de fréquence léger ou marqué, bifurcation, hystérésis) ont été observés, comme attendu (Svec et al., 1999). Dans le cas où aucune contrainte mécanique n'est appliquée sur les plis vestibulaires pour les maintenir écartés, ceux-ci peuvent se mettre à vibrer sous l'action de la pression d'air laryngée.

Publications et communications associées :

- Hanna N., Henrich N., Mancini A., Legou T., Laval X., Chaffanjon P. (2013) Singing excised human

Larynx	Condition	Age (years)	Height (m)	Weight (kg)	Aerodynamic condition				Mechanical condition			
					1 st Mode		2 nd Mode		1 st Mode		2 nd Mode	
					Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<u>LF1</u>	fresh	96	1.50	40	83	226	192	664			219	467
					[E1]	[A3]	[G2]	[E4]			[A3]	[A#4]
<u>LF2</u>	frozen	66	1.65	66	70	235	238	931	95	241	318	746
					[C#1]	[A#3]	[A#3]	[A#5]	[F#2]	[B3]	[D#4]	[F#5]
<u>LF3</u>	frozen	96	1.50	45	224	340			211	690	215	687
					[A3]	[F4]			[G#3]	[F5]	[G#3]	[F5]
<u>LF4</u>	frozen	81	1.65	65	65	895			292	713		
					[C2]	[A5]			[D4]	[F5]		
<u>LM1</u>	fresh	72	1.80	75	67	204			175	520	253	510
					[C2]	[G#3]			[F3]	[C5]	[B3]	[C5]
<u>LM2</u>	frozen	75	1.70	75	130	145	100	196	120	495	140	624
					[C3]	[D3]	[G#2]	[G3]	[B2]	[B4]	[C#3]	[D#5]
<u>LM3</u>	frozen	69	1.75	70	66	229	87	137	102	382	123	339
					[C2]	[A#3]	[F2]	[C#3]	[G#2]	[G4]	[B2]	[E4]
<u>LM4</u>	frozen	87	1.80	70	65	207	65	207	110	423	110	539
					[C2]	[G#3]	[C2]	[G#3]	[A2]	[G#4]	[A2]	[C5]

FIGURE 5.2 – Description des larynx excisés et de leurs capacités vibratoires (étendue de f_0 en Hz et notation musicale) selon les conditions de contrôle aérodynamique ou de contrôle mécanique. D'après Hanna, 2014.

larynges : relationship between subglottal pressure and fundamental frequency, MAVEBA 2013, Firenze, Italy. – MAVEBA Best Paper Award

- Robert Y., Bennani F., Hanna N., Henrich N., Chaffanjon P. (2014) Construction d'un modèle laryngé hybride. Mise au point d'un banc d'essai. 96e congrès de l'Association des Morphologistes, Amiens, Mars 2014.
- Hanna N., Henrich N., Bennani F., Morand L., Pelloux M., Legou T., Chaffanjon P. (2014) Singing excised human larynges : Investigating aerodynamical and biomechanical control of phonation, in 10th International Conference on Voice Physiology and Biomechanics, Salt Lake City, Utah, USA.
- Hanna N. (2014) Investigations of the acoustics of the vocal tract and vocal folds in vivo, ex vivo and in vitro, Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble et de l'UNSW, Sydney.

5.2 Modélisation aérodynamique de l'interaction entre les plis vocaux et les plis vestibulaires

Nous avons discuté en Section 3.3 l'implication des plis vestibulaires, encore appelées bandes ventriculaires ou fausses cordes vocales, dans de nombreux gestes phonatoires en parole, dans

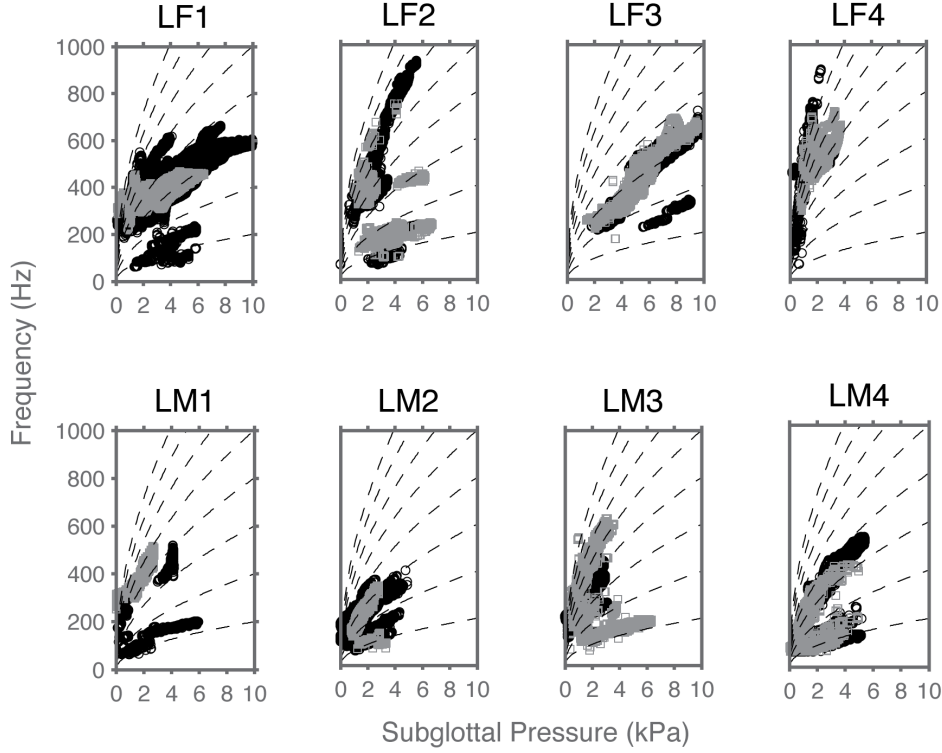


FIGURE 5.3 – Evolution de la fréquence fondamentale en fonction de la pression sous-glottique sous condition de contrôle aérodynamique (cercles noirs) ou mécanique (carré gris). Les lignes en pointillé représentent les courbes $f_0 = a\sqrt{P_{sg}}$ avec $a \in [5, 50]$.

le chant, dans le chuchotement, les grognements et le cri. Dans la modélisation de la parole, elles sont considérées comme des structures passives, écartées, qui n'interviennent pas dans le processus de phonation. Pourtant, bien que leurs propriétés biomécaniques diffèrent de celles des plis vocaux, elles sont capables de se rapprocher, de rentrer en contact, voire même de vibrer lors de gestes phonatoires parlés ou chantés. Dans le cadre des travaux de thèse de Lucie Bailly (Bailly, 2009), le comportement physique des plis vestibulaires a été modélisé et simulé dans son interaction avec le champ aérodynamique laryngé et avec le mouvement vibratoire glottique.

Les résultats obtenus par modélisation théorique et les mesures sur maquette montrent que la présence de plis vestibulaires peut effectivement perturber de façon significative le jet glottique et donc l'auto-oscillation des plis vocaux (Bailly et al., 2008). De manière plus précise, il a été montré que pour certaines configurations, la présence des plis vestibulaires pouvait favoriser l'auto-oscillation, alors que pour d'autres configurations, en particulier celles qui font intervenir des constriction importantes, la présence des plis vestibulaires tend à perturber voire à inhiber l'auto-oscillation des plis vocaux. Il a été montré que les phénomènes observés expérimentalement sont essentiellement instationnaires. Un recouvrement de pression important peut être observé, et prédit, pour des configurations anatomiquement plausibles. Ces configurations sont à rapprocher de celles qui sont mises en œuvre lors de certaines productions vocales (chants mongols, chant diphonique, chant du Bassu de Sardaigne, hard rock). Du point de vue de la modélisation

aérodynamique, la théorie fondée sur un modèle de jet turbulent pleinement développé semble la plus adéquate parmi les théories considérées pour expliquer les résultats expérimentaux. La dissipation par turbulence est cependant très largement sous-estimée dans ce modèle.

Un modèle simplifié à deux masses a permis de simuler le mouvement oscillatoire entretenu des plis vocaux, avec des paramètres biomécaniques ajustés pour refléter la réalité physiologique des plis et permettre une fréquence fondamentale de vibration adéquate (Bailly et al., 2014). La vibration vestibulaire a été considérée soit comme une donnée d'entrée de la simulation physique (approche A), soit comme une donnée de sortie d'un modèle physique global par ajout d'un modèle à deux masses additionnel (approche B).

Dans le cas de l'approche A, la variation d'aire vestibulaire a été extraite de l'analyse des images laryngées dans les séquences cinématographiques ultrarapides. L'impact physique aérodynamique de la vibration vestibulaire sur la vibration glottique a été simulé dans divers cas de mouvements vestibulaires : rapprochement sans contact, rapprochement avec contact, mise en vibration des plis vestibulaires. Les résultats des simulations ont été comparés aux signaux électroglottographiques et à leurs dérivés, montrant une bonne adéquation entre les modèles et la réalité physiologique de la vibration glottique. L'approche B a montré qu'il est possible de simuler la vibration conjointe des plis vocaux et des plis vestibulaires avec des modèles aérodynamiques relativement simples couplés à des modèles biomécaniques des plis laryngés. Ceci contribue au débat plus général sur les raisons physiques de la vibration vestibulaire.

Publications et communications associées :

- Bailly L., Rutu N., Brutel C., Pelorson X., Henrich N. (2007) Etude théorique et expérimentale de l'influence d'une constriction sur le mouvement vibratoire des cordes vocales par application de modèles mécaniques, 18ième Congrès Français de Mécanique, Grenoble, Aug. 2007.
- Bailly L., Henrich N., Pelorson X. and Gilbert J. (2008) Vocal folds and ventricular bands in interaction : comparison between "in vivo" measurements and theoretical predictions, Acoustics'08, Paris
- Bailly L., Pelorson X., Henrich N., Rutu N. (2008) Influence of a constriction in the near field of the vocal folds : Physical modeling and experimental validation, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 124 (5), pp. 3296-3308.
- Bailly L., Henrich N., Pelorson X. (2010) Vocal fold and ventricular fold vibration in period-doubling phonation : Physiological description and aerodynamic modeling, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 127(5), pp. 3212-3222.
- Bailly L., Henrich Bernardoni N., Müller F., Rohlf A-K., Hess M. (2014) The ventricular-fold dynamics in human phonation. J Speech Lang Hear Res, vol.57, pp. 1219-1242.

5.3 Impact aérodynamique d'une forte constriction due à une paille en sortie des lèvres : étude sur maquette et sur l'humain

Si une constriction vestibulaire à proximité de la glotte a un impact aérodynamique sur le mouvement vibratoire glottique, qu'en est-il de toute autre constriction dans le conduit vocal ? Nous nous sommes intéressés à l'impact aérodynamique d'une constriction aux lèvres lors de la phonation à la paille. L'usage d'une paille comme un outil pour l'échauffement vocal, le placement de la voix ou la rééducation vocale est connu depuis de nombreuses années et pratiqué par les thérapeutes de la voix et les professeurs de chant (Amy de la Bretèque, 2000, 2004, 2014 ; Titze, 2006 ; Pillot-Loiseau et al., 2009). Si son effet sur la fonction phonatoire est reconnu empiriquement depuis longtemps, ce n'est que récemment que les scientifiques se sont penchés dessus

pour en caractériser les aspects physiologiques et physiques (Suarez et al., 2004 ; Laukkanen et al., 2008 ; Vampola et al., 2011 ; Laukkanen et al., 2012). Dans le cadre des thèses de doctorat de Benoît Amy de la Bretèque (2014) et de Noel Hanna (2014) et en collaboration avec Nicolas Rutu, deux approches complémentaires ont été choisies pour explorer l'impact aérodynamique d'une paille aux lèvres sur la vibration glottique et la gestion pneumo-phonique :

- (1) une étude sur maquette auto-oscillante des plis vocaux pour caractériser le champ aérodynamique du conduit laryngé et l'impact sur le comportement vibratoire glottique en fonction de la tension dans les plis vocaux.
- (2) une étude sur l'humain par mesure simultanée du débit d'air oral, de la pression intra-orale, de la pression sous-glottique directe, et du contact glottique par électroglottographie.

Nous reviendrons en Section 6.5 sur les travaux menés sur l'humain. Ils montrent en particulier les adaptations pneumo-phoniques du chanteur selon la hauteur de la note chantée et le diamètre de la paille. Pour une hauteur de note donnée, plus le diamètre de la paille est petit, plus la pression sous-glottique mesurée est élevée. Comme ces adaptations peuvent être induites par le comportement physique de l'instrument vocal, mais également contrôlées de façon volontaire ou involontaire par l'instrumentiste, c'est à dire le sujet chanteur, l'approche sur maquette nous permet de mettre en lumière les interactions aérodynamiques indépendamment de tout contrôle.

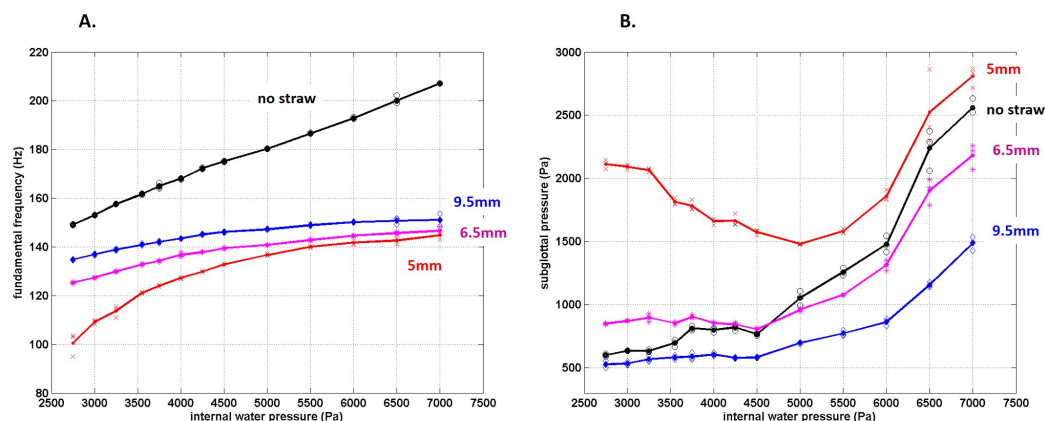


FIGURE 5.4 – Variation de la fréquence fondamentale (A) et de la pression sous-glottique (B) en fonction de la pression d'eau dans la réplique de plis vocaux pour divers diamètres de paille (5, 6.5 et 9.5mm) et pour la condition sans paille ("no straw" - tuyau ouvert).

La maquette utilisée pour reproduire le comportement physique du conduit vocal est un tube cylindrique en plexiglas de diamètre constant (2.5cm) et de longueur caractéristique de la production vocale humaine (18cm). Les plis vocaux sont répliqués par des boudins de latex remplis d'eau, dans lesquels on peut faire varier la pression d'eau. Des pailles de même longueur (15cm) et de trois diamètres différents ont été testées, comparativement à la configuration sans paille en extrémité de conduit. Trois sessions de mesure ont été effectuées, pour prendre en compte les résonances mécaniques de la maquette (session 2) et pour mesurer le débit aérodynamique en sortie de paille (session 3).

La Figure 5.4 illustre le comportement vibratoire de la maquette des plis vocaux, ainsi que la pression nécessaire à sa mise en auto-oscillation, selon le niveau de pression d'eau dans les plis. La maquette est capable d'osciller sur toute la gamme de pression interne aux plis étudiée, même dans le cas des petits diamètres de paille. Néanmoins, la pression sous-glottique minimale permettant l'oscillation est plus importante pour les pailles de petits diamètres et plus faible pour la paille de grand diamètre, comparativement à la configuration expérimentale sans paille. Nous retrouvons ainsi un résultat observé sur le chanteur.

La constriction aux lèvres due à la paille impacte la fréquence de vibration des plis vocaux, qui diminue de 20Hz à 60Hz selon le diamètre de la paille. Cette variation dépend des propriétés de résonance mécanique de la maquette. La mesure de débit aérodynamique en sortie de paille est intrusif, et modifie sensiblement le comportement physique global du système.

Publications et communications associées :

- Henrich N., Rutu N. (2012) What happens when a self-oscillating vocal-folds replica phonate into a straw ?, in International Conference on Voice Physiology and Biomechanics, Erlangen, Allemagne, July 2012
- Hanna N., Laval X., Henrich N. (2013) Phonation into straws : impact of an aeroacoustical load on in-vitro vocal fold vibration, 10th Pan-European Voice Conference PEVOC, Prague, République Tchèque.
- Hanna N. (2014) Investigations of the acoustics of the vocal tract and vocal folds in vivo, ex vivo and in vitro, Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble et de l'UNSW, Sydney.

5.4 Etude de l'influence de la source sur l'acoustique du conduit vocal

Nous venons de voir que des constriction au sein du conduit vocal, à proximité des plis vocaux (partie 5.2) ou en sortie aux lèvres (partie 5.3), induisent une modification mesurable du comportement vibratoire glottique. Il s'agit d'une action physique du filtre sur la source. Qu'en est-il de l'action de la source sur le filtre ? Nous avons cherché à explorer en quoi la modification des conditions aux limites en entrée du système pouvait affecter sa fonction de transfert, autrement dit les propriétés de résonance du conduit vocal. Comme précédemment, deux approches complémentaires ont été choisies : sur maquette, à partir d'un modèle mécanique dynamique du larynx dans un conduit vocal rigide, et en situation de phonation réelle sur des locuteurs et des chanteurs.

5.4.1 Etude sur maquette

Ces recherches ont débuté par une collaboration avec Anna Barney (ISVR, University de Southampton) dans le cadre d'une coopération bilatérale CNRS – Royal Society (2004-2005). Nous avons exploré les propriétés acoustiques du résonateur, en particulier les fréquences et largeurs de bande du premier formant, en fonction des caractéristiques de la source d'excitation acoustique.

Nous nous sommes appuyés sur la maquette dynamique mise en place par Anna Barney à Southampton. Cette maquette est constituée d'un tube rectangulaire en plexiglas aux dimensions similaires à un conduit vocal humain, dans lequel sont insérées deux répliques rigides de pli vocal actionnées mécaniquement. Elle peut être alimentée par un jet d'air laminaire. Cette maquette dynamique et simplifiée de l'instrument vocal humain permet une investigation fine

des aspects aérodynamique et acoustique de la production d'un son voisé. Nous avons montré que les propriétés acoustiques du résonateur en aval de la réplique de glotte dépendent de l'amplitude de l'ouverture glottique et du quotient ouvert, c'est à dire la durée d'ouverture relative (Barney et al., 2007). Les fréquences des deux premiers formants augmentent quand l'ouverture glottique augmente. Cette variation de fréquence formantique a également pu être modélisée théoriquement.

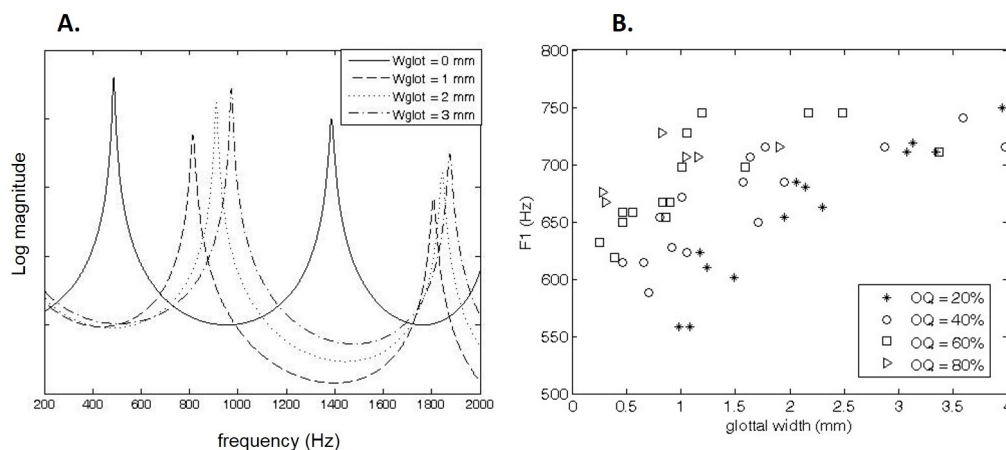


FIGURE 5.5 – A. Fonction de transfert théorique pour un conduit de 17.5cm ouvert à une extrémité (lèvres) et d'ouverture variable à l'autre (Wglott). D'après Barney et al., 2005.

B. Variation de la fréquence du premier formant F_1 mesuré sur la maquette dynamique en fonction des conditions d'amplitude (glottal width) et de durée relative d'ouverture glottique (OQ). D'après Barney et al., 2007.

5.4.2 Etude sur l'humain

Pour observer l'évolution du premier formant en fonction du comportement glottique chez l'humain dans la continuité de ces travaux sur maquette, les signaux acoustiques, électroglottographiques et aérodynamiques de 4 locuteurs (2 hommes, 2 femmes) ont été enregistrés pour une tâche de production de voyelles tenues de façon relâchée (supposant une large ouverture glottique) à tendue (supposant une faible ouverture glottique). Cette variation de qualité vocale s'accompagne d'une diminution notable du quotient ouvert (valeurs de OQ élevées en qualité relâchée et basses en qualité tendue). Les analyses montrent que la variation de qualité vocale de relâchée à tendue s'accompagne d'une augmentation de la fréquence estimée du premier formant et d'une diminution de sa largeur de bande, quelle que soit la voyelle. Ces observations sur l'humain vont à l'encontre des résultats obtenus in-vitro sur la maquette dynamique. Il y a vraisemblablement une adaptation articulatoire du locuteur à la tâche de production demandée, comme par exemple une modification plus globale de la configuration laryngée, une élévation du larynx qui induit un raccourcissement de la longueur acoustique du conduit vocal, des modifications de la hauteur tonale. La technique d'estimation formantique s'appuie sur la théorie source-filtre non-interactive et elle peut aussi fournir des résultats biaisés par l'hypothèse sous-jacente d'un conduit vocal acoustiquement fermé à la glotte, ou par la contribution du *formant glottique* au contenu spectral du son produit.

Pour limiter les biais liés à la technique d'estimation formantique, nous avons choisi d'effectuer des mesures physiques des résonances acoustiques du conduit vocal à partir de la technique d'impédancemétrie aux lèvres présentée en partie 2.4. Plusieurs gestes phonatoires pouvant induire des conditions aux limites différentes à la glotte ont été explorés : le chuchotement par rapport à la parole, le cri par rapport à la parole, et l'usage des mécanismes M1 ou M2 pour une même note chantée.

5.4.2.1 Cas du chuchotement

Dans le cadre de l'enregistrement de la base de données LYR2004 (cf. partie 4.1), il était demandé aux chanteurs de produire chaque voyelle non seulement en voix chantée sur différentes hauteurs, mais également en voix parlée et en voix chuchotée. La Figure 5.6 présente les fréquences mesurées de la première résonance pour les quatre voyelles /ɜ/ (*heard*), /ɑ/ (*hard*), /ɔ/ (*hoard*) et /u/ (*who'd*) parlées et chuchotées. Chaque point présente la production d'un chanteur en voix chuchotée par rapport à sa voix parlée. La fréquence de R1 est systématiquement plus élevée en voix chuchotée qu'en voix parlée, quel que soit le locuteur ou la locutrice. Comme le chuchotement implique une large ouverture glottique, ces observations vont dans le sens des résultats obtenus sur maquette. Une étude complémentaire a été menée par Sverdlin et al. (2010) sur 10 locutrices australiennes, montrant une différence moyenne de $255\text{Hz}(\pm 90\text{Hz})$ entre voix parlée et voix chuchotée.

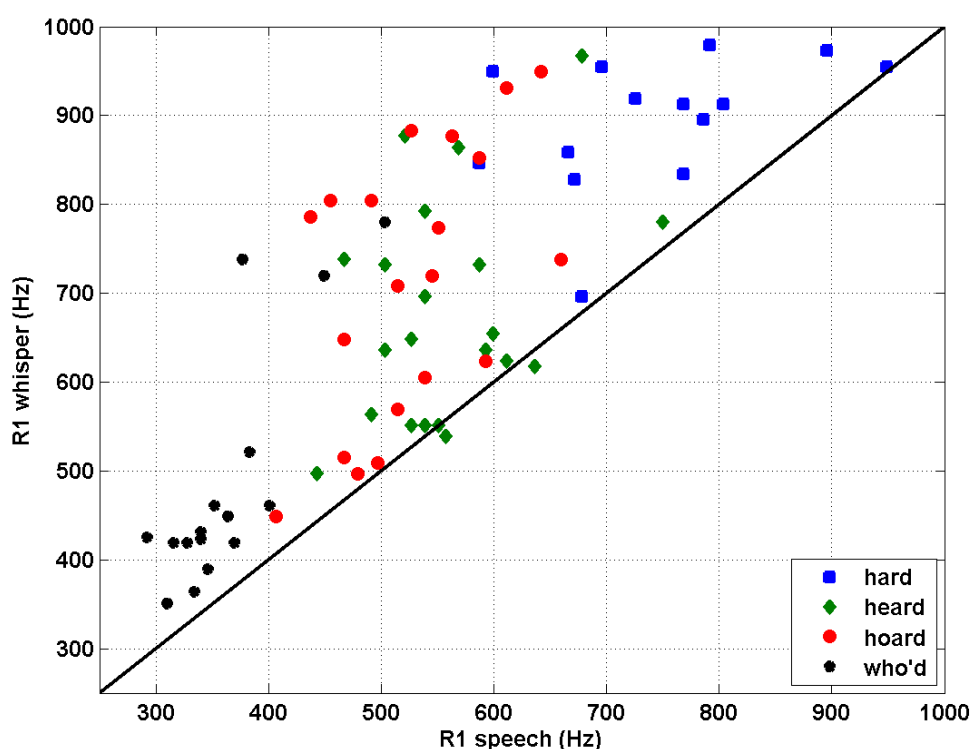


FIGURE 5.6 – Fréquences de la première résonance $R1$ en voix chuchotée et en voix parlée pour des 22 locuteurs de la base LYR2004 et les quatre voyelles.

5.4.2.2 Cas du cri

Une étude pilote a été menée sur une locutrice native du français, pour les sept voyelles orales /a/, /ε/, /e/, /y/, /u/, /o/ et /œ/ produite en voix parlée normale et forte. Trois niveaux de contrôle ont été testés : une production des voyelles sans contrôle particulier (session S1), une production des voyelles avec maintien volontaire de la hauteur tonale entre voix parlée normale et forte (session S2), et une production des voyelles avec maintien volontaire de la hauteur tonale et du geste articulatoire entre voix parlée normale et forte (session S3). Ainsi que l'illustre la Figure 5.7 dans l'espace vocalique, la voix criée implique quasi-systématiquement pour cette locutrice une augmentation de la fréquence de la première résonance et dans des proportions qui ne peuvent pas s'expliquer uniquement par une montée du larynx. Nous retrouvons donc la tendance observée lors des estimations formantiques menées sur quatre locuteurs produisant des variations de qualité vocale de relâchée à tendue, à l'encontre des observations théoriques et sur maquette. Même pour la session S3, qui se caractérise par un maintien de l'ouverture labiale chez cette locutrice, la fréquence de R1 augmente sensiblement pour les voyelles ouvertes (+97Hz pour /a/ et /ε/).

Il est probable que cette évolution des fréquences de résonance en voix criée reflète des ajustements laryngés et pharyngés involontaires du sujet, en particulier une constriction vestibulaire qui induirait une diminution de la longueur acoustique du conduit vocal. Elle peut provenir également d'une augmentation de l'ouverture labiale, qui est effectivement observée dans les cas non-contraints. Des effets de l'amplitude d'ouverture glottique ou du quotient ouvert, s'ils ont lieu, sont vraisemblablement de second ordre et ne peuvent pas être mis en évidence dans ce cas.

5.4.2.3 Cas d'un changement de mécanisme laryngé sur une même note tenue en voix chantée

Comme nous l'avons vu en partie 3.1, les mécanismes laryngés M1 et M2 diffèrent en particulier par l'amplitude d'ouverture glottique et par le temps ouvert glottique relativement à la durée du cycle glottique. Dans la base LYR2005, il a été demandé aux chanteurs de produire les notes de leur zone de recouvrement des mécanismes laryngés en faisant usage de l'un puis de l'autre des mécanismes M1 et M2, quand ils le pouvaient. Nous avons ainsi recueilli des données pour sept chanteurs d'opéra (2 barytons, 5 ténors). Un modèle simplifié de propagation acoustique a été appliqué pour tester si les différences de fréquence de résonance observées pourraient s'expliquer par un changement de l'aire d'ouverture glottique.

Dans la zone de fréquence commune aux deux mécanismes laryngés où les chanteurs peuvent faire usage de l'un ou l'autre des mécanismes M1 et M2, les fréquences des deux premières résonances sont fonction du mécanisme laryngé choisi et du registre dans lequel s'exprime le chanteur. Pour une même note et voyelle chantée, la première résonance R1 est plus basse en M2 qu'en M1 d'environ 65Hz, et la seconde résonance R2 plus basse en M2 qu'en M1 d'environ 90Hz (voir Figure 5.8). Les variations de fréquence des résonances du conduit vocal mesurées pour une même voyelle et une même hauteur chantée en M1 ou M2 ne sont que faiblement corrélées aux modifications du quotient ouvert ou à une variation possible de longueur du conduit vocal du fait d'un mouvement vertical du larynx. Le modèle acoustique appliqué montre que ces variations de fréquence pourraient s'expliquer par une ouverture glottique plus réduite de 60 % à 70 % en mécanisme M2 par rapport au M1.

Publications et communications associées :

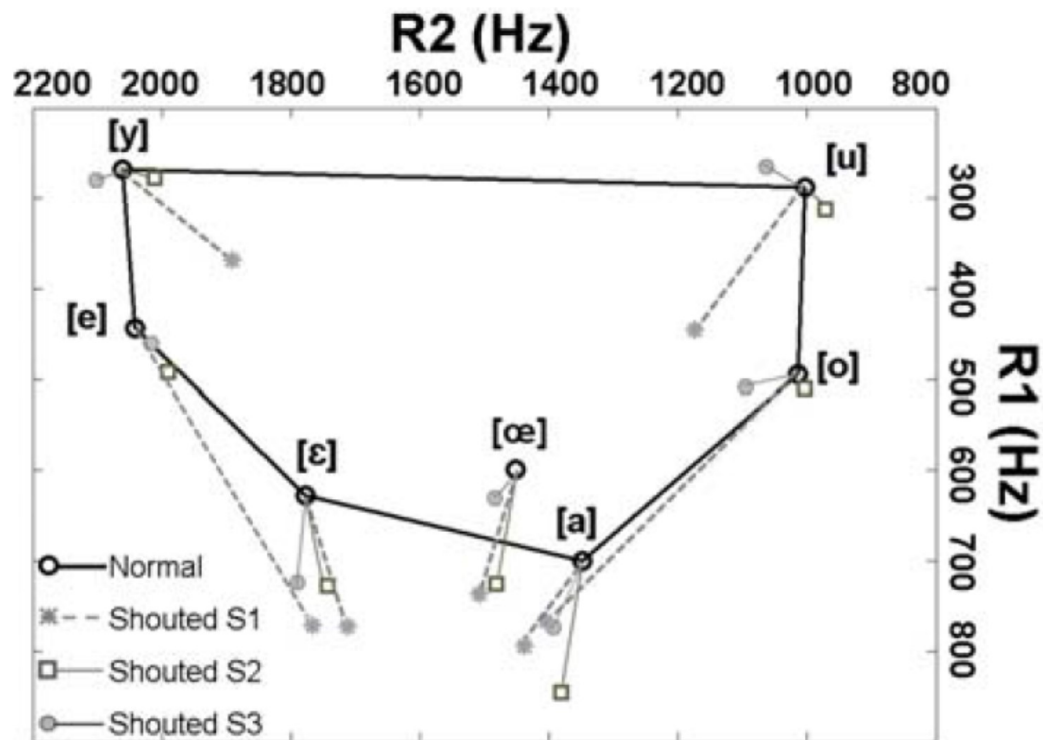


FIGURE 5.7 – Evolution moyenne des fréquences des deux premières résonances entre voyelles parlées et voyelles criées selon trois conditions de contrôle (S1 : sans contrôle ; S2 : avec contrôle de la hauteur tonale ; S3 : avec contrôle de la hauteur tonale et du geste articulatoire). D'après Garnier et al., 2008

- Barney A., De Stefano A. and Henrich N. (2005) The effect of glottal opening on the acoustic response of the vocal tract, In proc. Forum Acusticum, Budapest, Hungary, Sept. 2005.
- Barney A., De Stefano A. and Henrich N. (2007) The effect of glottal opening on the acoustic response of the vocal tract, Acta Acustica united with Acustica, vol. 93 (6), pp. 1046-1056.
- Garnier, M., Wolfe, J., Henrich, N. and Smith, J. (2008) Interrelationship between vocal effort and vocal tract acoustics : a pilot study, Actes de ICSLP, Brisbane, Australie.
- Henrich Bernardoni N., Smith J., Wolfe J. (2014) Vocal tract resonances in singing : variation with laryngeal mechanism for male operatic singers in chest and falsetto registers. J. Acoust. Soc. Amer., vol. 135 (1), pp. 491-501.

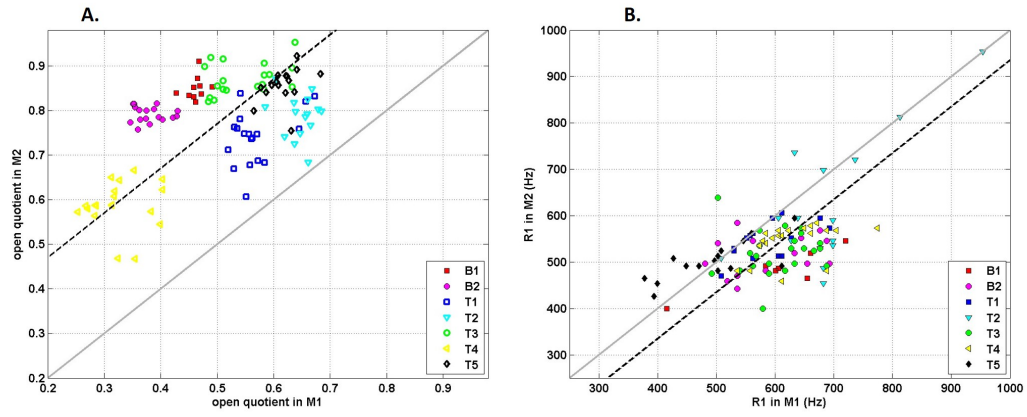


FIGURE 5.8 – A. Evolution du quotient ouvert pour une même note et même voyelle chantée en mécanisme laryngé M1 ou M2. La droite oblique pleine présente l'égalité $OQ_{M2} = OQ_{M1}$, et celle en pointillé $OQ_{M2} = OQ_{M1} + 0.27$.
 B. Evolution de la fréquence de la première résonance pour une même note et même voyelle chantée en mécanisme laryngé M1 ou M2. La droite oblique pleine présente l'égalité $R1_{M2} = R1_{M1}$, et celle en pointillé $R1_{M2} = R1_{M1} - 65 \text{ Hz}$. D'après Henrich et al., 2014

6

Santé vocal, apprentissage et rééducation

La voix est à la fois l'instrument et l'instrumentiste. Dans les chapitres précédents, nous nous sommes intéressés au fonctionnement physiologique et physique de l'instrument vocal humain pour diverses formes d'expressions. S'il semble possible d'étudier la physique des phénomènes d'interactions pneumo-phono-résonantiels de façon dissociée du contrôle de l'instrumentiste par une approche théorique, une approche sur maquette ou sur pièce anatomique, le comportement pneumo-phono-résonantiel des locuteurs et des chanteurs reflète toujours un instrumentiste en interaction avec son instrument. Quand le geste vocal du locuteur ou du chanteur est inadapté à la situation de communication, quand il ne s'inscrit plus dans un équilibre entre souffle et son, des troubles de la voix peuvent survenir. La question de la santé vocale, de la prévention à la rééducation, est donc au coeur de nos recherches, comme un objectif majeur des travaux menés sur les interactions pneumo-phono-résonantielles. Dans ce chapitre, nous explorons le comportement vocal de l'instrumentiste dans diverses situations auxquelles il doit s'adapter : un environnement bruyant (parole dans le bruit), un art vocal extrême (human beatbox), une opération chirurgicale (morbidity vocale d'une chirurgie endocrinienne cervicale), des exercices de rééducation vocale (méthode de la paille), l'apprentissage d'une langue étrangère, une affection neurodégénérative (la maladie d'Alzheimer).

6.1 De l'effort au forçage vocal, ou comment le locuteur s'adapte à une situation de communication perturbée

Un tiers des actifs utilise leur voix comme un outil de travail au quotidien. Ces personnes sont souvent confrontées à des troubles vocaux, tels une fatigue vocale, un enrouement, une aphonie. Elles peuvent développer des pathologies, comme l'apparition de nodules ou de polypes sur les plis vocaux, nécessitant une rééducation du geste vocal et éventuellement une opération chirurgicale. C'est en particulier le cas des enseignants, une population à risque où les troubles fonctionnels de la voix sont fréquemment observés et ont un coût important lié aux arrêts de travail répétés (rapport INSERM, 2007). Le forçage vocal est donc un problème de santé publique, qu'il convient de mieux comprendre et de prévenir. Nous ne sommes pas tous égaux face au développement de troubles de la voix. Pourquoi certains locuteurs sont-ils plus à même de les développer que d'autres ? Pour étudier le comportement d'effort vocal dans la parole, et mieux cerner comment ce comportement peut amener au forçage vocal, nous avons choisi d'explorer la communication en environnement bruyant. Ces travaux ont été menés par Maëva Garnier dans

le cadre de sa thèse de doctorat (Garnier, 2007).

Les recherches se sont focalisées sur le comportement d'adaptation du locuteur à cette situation de communication perturbée qu'est la parole dans le bruit. Le fait de parler différemment dans le bruit, en particulier plus fort et plus aigu, est connu sous le nom d'effet Lombard (Lombard, 2011 ; Junqua, 1993). S'agit-il uniquement d'un effet réflexe, et donc mis en place de façon involontaire par le locuteur, ou d'une stratégie du locuteur pour communiquer en situation adverse ? Cette question au coeur des travaux de thèse a été abordée sous divers angles. En s'appuyant sur une situation de communication interactive entre deux locuteurs qui devaient se transmettre des informations (comprenant des mots cible) pour compléter une carte, une base de données de 10 locuteurs (5 femmes, 5 hommes) a été enregistrée pour deux types de bruit (bruit blanc et bruit cocktail), quatre niveaux sonores (62 à 86 dB) et deux types d'immersion sonore (diffusion au casque ou par deux haut-parleurs) (Garnier et al., 2006a ; Garnier, 2007 ; Garnier et al., 2010b). L'analyse de ces données a révélé la grande variabilité interindividuelle des comportements d'adaptation à une situation de communication perturbée : si l'effet lombard apparaît comme linéairement croissant en fonction du bruit sur une population moyennée, ce moyennage masque les comportements spécifiques de chaque individu (Garnier et al., 2006b). Les locuteurs vont parler plus fort et plus aigu, mais ils vont également adapter d'autres aspects de leur parole dans sa multimodalité, c'est à dire renforcer des contrastes acoustiques (rapport signal sur bruit, contraste vocalique, enrichissement spectral dans les hautes fréquences, ajustement tonal, ralentissement du débit de parole) et des contrastes visuels aux lèvres (ouverture labiale, protrusion) (Garnier et Henrich, 2014). Une étude plus ciblée du comportement acoustique et articulatoire de trois locutrices a également mis en évidence le renforcement d'indices prosodiques de structuration de l'énoncé (Garnier, 2007). Ces adaptations de la parole dans le bruit dépendent du degré d'interaction avec l'interlocuteur (Garnier et al., 2010b).

Toutes ces observations plaident en faveur d'une adaptation du locuteur à la situation de communication en environnement bruyant qui ne soit pas uniquement vocale, réflexe et subie, mais qui reflète une volonté de se faire comprendre de son interlocuteur par un contrôle et un ajustement de sa parole adaptés à la situation de communication. Dans ce cadre, le forçage vocal peut s'envisager à un niveau plus global que le simple niveau des efforts laryngés, comme une gestion inadaptée et inefficace de l'effort communicationnel (Garnier et al., 2007).

Publications et communications associées :

- Garnier M, Dubois D, Henrich N. (2006a) Constitution de corpus de parole semi-spontanée en environnement bruyant : intérêts et applications d'une telle méthodologie, Actes des rencontres Jeunes Chercheurs "langues et langage", Paris. 2006
- Garnier M., Henrich N., Dubois D., Poitevineau J. and Polack J.D. (2006b) Peut-on considérer l'effet Lombard comme un phénomène linéaire en fonction du niveau de bruit ?, 8ième Congrès Français d'Acoustique, Tours, Avril 2006.
- Garnier, M., Dubois, D., Henrich, N. (2007) Bruit et voix : de l'adaptation au forçage vocal. Dans Perturbations et Reajustements. Langue et langage. Ed. B. Vaxelaire, R. Sock, G. Kleiber et F. Marsac : 63-71.
- Garnier, M. (2007) Communiquer en environnement bruyant : de l'adaptation jusqu'au forçage vocal. Thèse de Doctorat en Acoustique-Phonétique, Université Paris 6.
- Garnier M., Henrich N., Dubois D. (2010) Influence of Sound Immersion and Communicative Interaction on the Lombard Effect, J. Speech Lang. Hear. Res., vol. 53, pp. 588-608.
- Garnier, M., Henrich, N. (2014) Speaking in noise : How does the Lombard effect improve acoustic contrasts between speech and ambient noise ? Comput. Speech Lang. vol. 28, pp. 580-597.

6.2 Le Human Beatbox

La voix est sans aucun doute l'instrument de musique le moins cher au monde : chacun naît avec cet instrument et peut s'entraîner à le développer dans une esthétique propre. Au-delà de ses fonctions de communication, l'instrument vocal humain est capable de produire une grande diversité de sonorités, et d'imiter toutes sortes d'autres instruments de musique (e.g. percussions, trompette, saxophone, harmonica, guitare). Parmi les pratiques vocales artistiques actuelles, le Human Beatbox (en français, boîte à rythme humaine) est à l'avant-garde de l'exploitation des possibilités de l'instrument vocal humain. Il s'agit d'un mouvement culturel musical en plein essor, qui impacte fortement les jeunes, mais aussi les moins jeunes (Martino, 2009). La pratique du Human Beatbox s'est développée au cours des années 1980. Elle fait partie de la culture hip-hop. Elle consiste en l'imitation vocale de rythmes et d'instruments afin de former une mélodie créant l'illusion d'une musique polyphonique (Ojamaa et Ross, 2009). Cette mélodie peut être la superposition de quatre voire cinq sortes de sons et de bruits. Le beatbox peut se pratiquer *a capella* ou avec amplification, en individuel ou en groupe. Le musicien pratiquant le Human Beatbox, le beatboxer, utilise une large palette de techniques vocales afin de reproduire au mieux un son désiré, en donnant éventuellement l'illusion que ce son ne provient pas d'une voix humaine. Jusqu'à présent, rares sont les études scientifiques qui se sont intéressées à ce style musical émergent (Lederer, 2005 ; Stowell et Plumbley, 2008 ; Proctor et al, 2013). Il s'agit pourtant d'une pratique vocale à risque (Clouet et De Torcy, 2010 ; De Torcy et al., 2014). De plus, l'étude des différents gestes mis en place par les chanteurs de Human Beatbox présente un intérêt majeur pour des recherches plus fondamentales sur les interactions pneumo-phono-résonantielles en voix humaine.

Une première étude pilote a été menée sur trois chanteurs de beatbox professionnels pour explorer les propriétés physiologiques, acoustiques et aérodynamiques des sons produits (Henrich et al., 2011). Nous avons observé la grande variété des comportements phonatoires et articulatoires. Ces chanteurs jouent de leur instrument vocal avec virtuosité et inventivité, cherchant sans cesse à produire des sons nouveaux. Les mesures aérodynamiques montrent des valeurs très élevées de la pression intra-orale pour la production des sons occlusifs. Nous avons donc ciblé une seconde étude sur l'efficacité vocale de la production de consonnes occlusives dans le Human Beatbox, dans le cadre du mémoire d'orthophonie de Vanessa Bourdin et Alexia Navion (Bourdin et Navion, 2013). Les stratégies aérodynamiques et acoustiques de 4 chanteurs professionnels ont été comparées pour la parole, le cri, le chant, la voix projetée et le human beatbox (voir Figure 6.1).

Dans le cadre de cette même étude, une enquête a été menée sur une population de 53 chanteurs pratiquant le Human Beatbox de façon professionnelle (19%) ou amateur (81%), afin de mieux comprendre leur rapport à leur instrument (hygiène de vie, hygiène vocale, préparation et entraînement, choix des sons). Les réponses ont montré que le Human Beatbox est pratiqué de façon intensive, quotidienne et que les chanteurs ont une grande conscience des besoins d'hygiène de vie et d'hygiène vocale que requiert leur pratique vocale. Ils ne semblent pas souffrir de troubles de la voix chroniques, mais ils font état de fatigue vocale possible après la pratique. Dans une troisième étude, nous nous sommes intéressés aux gestes articulatoires (larynx, langue, lèvres) d'un chanteur professionnel (Paroni, 2014). Ces gestes ont été observés par imagerie ultrasonore de la langue et visualisation par cinématographie ultra-rapide des lèvres. Cette étude exploratoire a permis de catégoriser de façon articulatoire et phonétique la palette des sons de Human Beatbox produit par ce chanteur, et de décrire précisément les mouvements des lèvres et d'une partie de la langue associés aux sons produits.

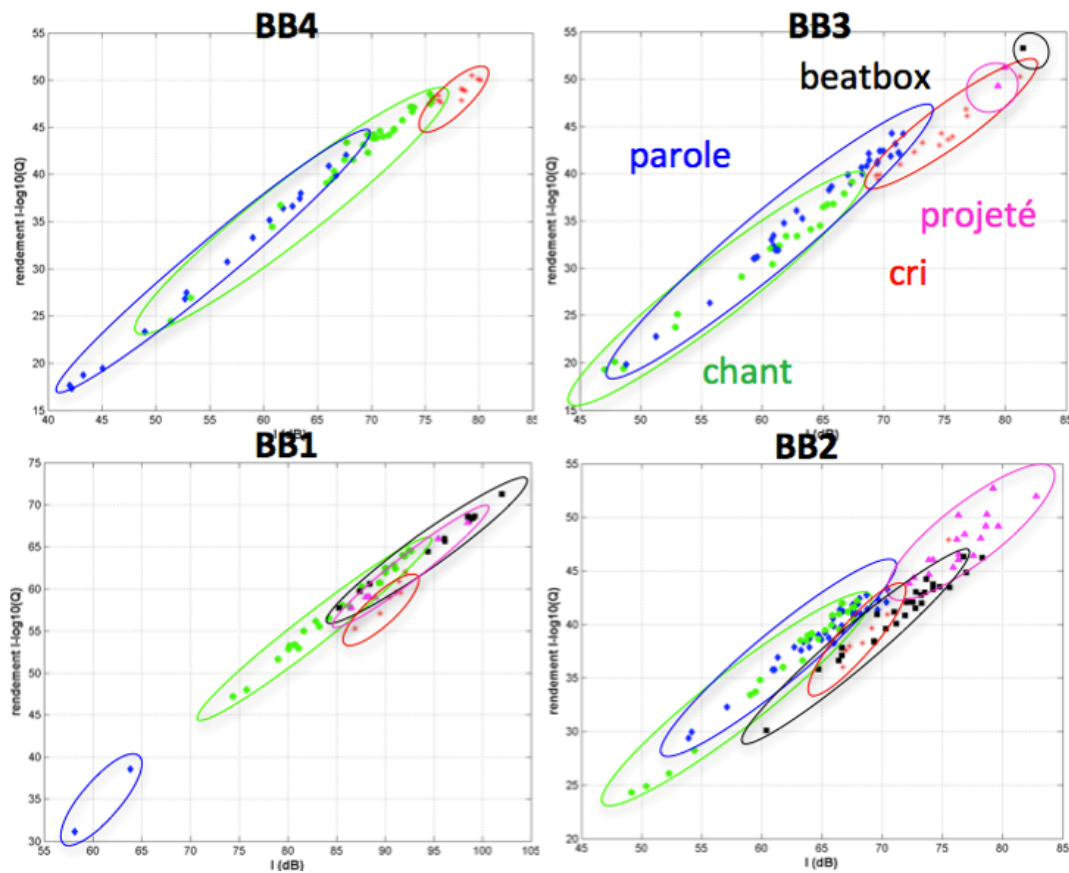


FIGURE 6.1 – Rendement vocal (dans le débit : $R_q = I_{db} - 10 * \log_{10} D_{oral}$) en fonction de l'intensité pour les quatre chanteurs de beatbox et différents modes d'expression (parole, parole projetée, cri, chant, beatbox). D'après Bourdin et Navion, 2013.

Publications et communications associées :

- Henrich N., Savariaux C., Hueber T., Garnier M., EZRA, L.O.S (2011) Physiology of Human Beatbox : acoustical, aerodynamical and articulatory analyses, Pan-European Voice Conference PEVOC9, Marseille, Sept. 2011.
- Bourdin V., Navion A. (2013) Mesure de l'efficacité vocale au sein d'une population de chanteurs de Human Beatbox : analyse acoustique, aérodynamique et observation comportementale. Mémoire d'Orthophonie de l'Université Claude Bernard Lyon1, Juin 2013.
- Paroni A.(2014) How do beatboxers play with their tongue and lips ? An ultrasound and high-speed imaging exploration. Rapport de stage ERASMUS.

6.3 Impact sur la voix parlée et chantée d'une chirurgie endocrinienne cervicale

L'ablation partielle ou totale des glandes thyroïde et parathyroïdes est un geste chirurgical à risque pour les fonctions laryngées que sont la déglutition, la respiration et la phonation. Dans ce projet, nous nous intéressons spécifiquement à l'impact des thyroïdectomies et parathyroïdectomies sur la fonction phonatoire. Les troubles de la voix peuvent avoir des origines variées : traumatisme de l'intubation, blessure ou dénervation de la musculature externe du larynx, bles-

sure directe des nerfs laryngés supérieurs et inférieurs. Certaines de ces lésions peuvent être temporaires, d'autres définitives. La rééducation permet alors la récupération des performances vocales perdues, la prévention du développement de comportements phonatoires inadaptés et de difficultés vocales alors même que les plis vocaux ont retrouvé leur mobilité, ou la mise en place de compensations de la fonction laryngée dans le cas de lésion définitive. Il est important de différencier les atteintes de la voix parlée et celles de la voix chantée, et aussi les atteintes concernant des patients habitués à solliciter fortement leur voix ou non. Des études récentes se sont intéressées à l'incidence, la nature, la sévérité et la durée des éventuelles complications vocales après chirurgie des glandes thyroïde et parathyroïdes (Debruyne et al., 1997 ; Meek et al., 2008 ; Van Lierde et al., 2010). Ces études réalisées sur un grand nombre de patients montrent que, même si des variations de qualité vocale sont observées dans les premiers jours qui suivent l'opération (fréquence fondamentale qui diminue, par exemple), les patients retrouvent, sur la production d'une voyelle tenue, leur qualité vocale pré-opératoire au plus tard 3 mois après l'opération dans le cas où les nerfs laryngés n'ont pas été atteints.

Ces études se limitent à une évaluation vocale menée sur une voyelle tenue. Qu'en est-il des réelles capacités à parler et chanter du patient ? Pour tenter de répondre à cette question, nous avons mené une étude longitudinale au CHU de Grenoble, au sein de la Clinique de Chirurgie Thoracique, Vasculaire et Endocrinienne du Pôle Cardiovasculaire et Thoracique (P04) et en collaboration avec le cabinet de Phoniatrie de Grenoble (Dr Jocelyne Sarfati). Cette étude a combiné une évaluation pré- et post-opératoire des possibilités vocales parlées et chantées du patient, du comportement fonctionnel laryngé évalué par endoscopie et du ressenti du patient, avec le détail du déroulement avéré de l'opération. L'objectif de cette étude était de quantifier l'impact vocal du geste chirurgical de thyroïdectomie, afin de mieux en comprendre les conséquences sur la santé vocale et pouvoir proposer un suivi adapté selon le patient. Un protocole d'évaluation de la morbidité vocale dans la parole et dans le chant a été inclus dans les soins courants et proposé à un grand nombre de patients. Il a permis de tester l'impact de la chirurgie sur les capacités vocales parlées et chantées des patients, en combinant des examens dynamiques fonctionnels avec un examen laryngé, une évaluation perceptive et les données per-opératoires. Un interne en stage de Master M2 (Sébastien Guigard) et une étudiante en orthophonie (Claire Lalevée-Huart) ont contribué à la prise de données et aux analyses. 82 patients ont été enregistrés en pré- et post-opératoire. Cela constitue une base de données conséquente : signaux acoustiques et aérodynamiques, questionnaires sur le ressenti vocal (Voice Handicap Index), bilan opératoire, et bilan laryngologique.

Sur les 82 patients enregistrés, 72 étaient exploitables. Les analyses comparatives entre les productions vocales pré- et post-opératoires de ces patients démontrent que :

- (i) 2/3 des patients présentent des différences acoustiques en fréquence et en intensité 4 à 6 semaines après l'opération,
- (ii) la moitié des patients présente une baisse de la fréquence fondamentale (f_0) et une diminution de la dynamique vocale en voix parlée,
- (iii) 3/4 des patients présentent une limitation de l'étendue fréquentielle dans les aigus ainsi qu'une atteinte de l'intensité soit dans la dynamique *piano* soit dans la dynamique *forte* en voix chantée,
- (iv) les auto-évaluations subjectives (VHI-10) ne s'accordent aux observations acoustiques que pour la moitié des patients

- (v) 11 patients présentent une plainte vocale persistante en voix parlée et surtout chantée à plus d'un an et demi de l'opération.

Une thèse de doctorat récente est venue appuyer nos observations en s'intéressant aux stratégies de compensation ou de réajustement de la parole des patients (Fauth, 2012). La morbidité vocale des chirurgies endocriniennes cervicales n'est donc pas anecdotique, et elle doit faire l'objet d'une évaluation systématique dans le cadre des soins. Elle impacte le confort vocal du patient en parole, et le potentiel de sa voix chantée. Cette étude a mis en avant l'importance d'intégrer une évaluation de la morbidité vocale aux soins courants, et elle a testé les possibilités et les limites d'un protocole d'évaluation vocale.

Publications et communications associées :

- Sarfati J., Guigard S., Henrich N., Chaffanjon P. (2011) Etat vocal et laryngé après thyroïdectomie et parathyroïdectomie, 67ième Congrès de la Société Française de Phoniatrie, Oct. 2011
- Guigard S., Henrich N., Sarfati J. Savariaux C., Chaffanjon P. (2012) Evaluation de la morbidité vocale après chirurgie endocrinienne cervicale, 68ième Congrès de la Société Française de Phoniatrie, Oct. 2012
- Guigard S., Henrich N., Sarfati J. Savariaux C., Chaffanjon P. (2012) Assessment of vocal morbidity following cervical endocrine surgery, 5th International Congress of World Voice Consortium, Luxor, Egypt.
- Lalevée-Huart C., Henrich N., Guigard S., Sarfati J. Savariaux C., Chaffanjon P. (2013) Impact des chirurgies endocriniennes cervicales sur la voix parlée et chantée, Congrès Français d'ORL, Paris.
- Lalevée-Huart C., Henrich N., Guigard S., Sarfati J. Savariaux C., Chaffanjon P. (2013) Impact des chirurgies endocriniennes cervicales sur la voix parlée et chantée, 5ièmes Journées de Phonétique Clinique JPhC5, Liège, Belgique. – JPhC5 Best Poster Award
- Guigard S., Lalevée C., Henrich Bernardoni N., Chaffanjon P., Sarfati J., Savariaux C. (2014) Morbidité vocale de la chirurgie endocrinienne cervicale : cas de la thyroïdectomie et parathyroïdectomie. Atelier Sciences et Voix ASV2.4, Janvier 2014.

6.4 La voix chantée pour améliorer l'apprentissage phonétique du Français Langue Etrangère (FLE)

Des observations empiriques ont montré l'apport d'un travail en voix chantée pour faciliter l'apprentissage phonétique d'une langue étrangère. Il s'agit d'un champ de recherche novateur et encore peu développé, dans la continuité des études cognitives montrant l'impact de la musique dans les processus d'apprentissages. Ce projet de recherche s'inscrit donc dans le cadre de l'enseignement/apprentissage d'une langue seconde. Il a fait l'objet de la thèse de doctorat de Sandra Cornaz (2014) en co-tutelle avec l'Université de Turin et co-dirigée avec Nathalie Vallée et Antonio Romano. L'étude a été menée sur une population de jeunes adultes italophones apprenant le Français comme langue seconde. L'acquisition par des italophones des voyelles antérieures arrondies du français (/y/ et /ø/ dans cette étude) est une difficulté connue des didacticiens.

Grâce aux compétences d'enseignement du FLE combinées à une pratique musicale de la doctorante, une nouvelle méthode didactique d'enseignement-apprentissage du FLE a été élaborée pour l'étude (Cornaz et al., 2009, 2010). Cette méthode ajoute à des outils didactiques traditionnels de phonétique corrective des exercices en voix chantée et des comptines conçues pour l'apprentissage phonétique des voyelles /y/ et /ø/ du français. L'intérêt de ces exercices en voix chantée a été testé en Italie sur une population de seize étudiants italophones apprenant du français, répartis en deux groupes. Le premier groupe a reçu un enseignement traditionnel de phonétique corrective (4 séances de 2h, soit 8h au total), et le second a reçu le même enseignement complété par des exercices en voix chantée pour une même durée d'enseignement. Les résultats montrent que les espaces vocaliques de tous les sujets évoluent vers une mise en

place des voyelles /y/ et /ø/ après la période d’enseignement, sans qu’il y ait un effet marqué du type de méthode. Les résultats reflètent une grande variabilité interindividuelle dans les productions vocaliques des locuteurs italophones. Ils montrent la mise en place de la focalisation formantique attendue en français pour les voyelles fermées /y/ (rapprochement F_2 - F_3) et /i/ (rapprochement F_3 - F_4). Ces observations mettent en lumière que l’acquisition de sons nouveaux procède d’un processus complexe et intégratif qui va non seulement modifier la structure du système phonologique mais également les caractéristiques spectrales des voyelles. Ainsi l’apprentissage phonétique du /y/ par ces italophones va induire une évolution dans leur prononciation du /i/.

Pour compléter cette étude en production, une étude en perception a été menée sur 62 sujets italophones (41 femmes, 21 hommes) pour explorer si la discrimination de voyelles non-natives (en l’occurrence les voyelles /y/ et /ø/ du français) pouvait varier selon certains facteurs qui distinguent la parole du chant, à savoir la durée vocalique et la hauteur tonale. L’impact du contexte consonantique a également été étudié. Ces paramètres (durée vocalique, hauteur tonale, contexte consonantique) sont très sollicités dans la méthode verbo-tonale d’intégration phonétique largement utilisée en enseignement-apprentissage du FLE (Renard, 2002). Aucun effet de la hauteur tonale, de sa variation, et de la durée vocalique n’ont été mis en évidence sur la discrimination perceptive des voyelles non natives /y/ et /ø/. Par contre, le contexte consonantique impacte fortement la discrimination /y/-/u/ en contraste postérieur, la voyelle /y/ étant mieux discriminée de la voyelle /u/ quand l’environnement consonantique est /t/ plutôt que /p/. Comme joliment résumé par A. Arleo lors de la soutenance, “il vaut mieux évoquer avec les apprenants *“la toux qui tue”* que *“le poux qui pue”*”.

Publications et communications associées :

- Cornaz S., Henrich N., Vallée N., Romano A. (2009) Peut-on utiliser le travail en voix chantée pour améliorer la correction phonétique segmentale en langue étrangère ? Le cas de locuteurs italiens apprenants de Français Langue Étrangère. Actes des Rencontres Jeunes Chercheurs en Parole, Avignon, France.
- Cornaz S., Henrich N., Vallée N. (2010) L’apport d’exercices en voix chantée pour la correction phonétique en langue étrangère : le cas du français langue étrangère appliqué à des apprenants italiens d’âge adulte, Les Cahiers de l’APLIUT, Vol. XXIX No 2, pp. 103 - 121, Juin 2010.
- Sandra Cornaz (2014) L’apport de la voix chantée pour l’intégration phonético-phonologique que d’une langue étrangère : application auprès d’italophones apprenants de FLE. Thèse de Doctorat de l’Université de Grenoble et de l’Université de Turin.

6.5 Rééducation vocale à la paille

La technique de rééducation vocale à la paille déjà évoquée en partie 5.3, encore appelée méthode de la paille, est un outil de rééducation orthophonique des dysphonies dysfonctionnelles très répandu en France et dans le monde. Plus généralement, des exercices portant sur des constriction du conduit vocal sont utilisés pour aider le patient à adapter son geste de façon adéquate et trouver un bon équilibre pneumo-phono-résonantiel. Ces constriction peuvent être liées à des gestes articulatoires spécifiques (consonnes fricatives, voyelles), ou à des accessoires comme une paille de diamètre variable (entre 2mm et 5mm) ou un tube (“resonant tube”). En France, cette technique de rééducation impose aussi un débit d’air en sortie de paille soutenu et indépendant de la fréquence. Dans le cadre du travail de thèse de Benoît Amy de la Bretèque (2014) et de sa pratique clinique quotidienne, le comportement aérodynamique du système lors d’exercices de rééducation vocale à la paille a été étudié, afin de mettre en lumière les possibilités

et les limites de cette technique de rééducation orthophonique.

Plusieurs corpus ont été enregistrés depuis 2007, comprenant des mesures directes par ponction trachéale de la pression sous-glottique en phonation, de la pression intra-oral du conduit vocal, et du débit en sortie de paille. Les mesures aérodynamiques montrent que le débit d'air reste relativement constant en sortie de paille quelle que soit la note chantée, ainsi que le recommande la méthode. Cette constance du débit s'accompagne d'un maintien de la pression intra-orale (P_{IO}). La pression sous-glottique (P_{SG}), par contre, augmente avec la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux. Si ces trois paramètres aérodynamiques dépendent du diamètre de la paille, la différence entre pression sous- et supra-glottique, encore appelée pression trans-glottique $\Delta P = [P_{SG} - P_{IO}]$, n'en dépend pas. La pression trans-glottique ΔP est identique au seuil de pression phonatoire (SPP) pour chaque note, seuil mesuré comme la pression sous-glottique minimale requise pour la mise en vibration des plis vocaux pour produire une voyelle /a/ tenue. La valeur minimale du SPP est mesurée à la fréquence fondamentale usuelle de la voix, pour le sujet chanteur et pour une population de 36 adultes euphoniques. Des séances de rééducation vocale à la paille ont comme effet d'abaisser les valeurs de SPP d'un sujet, que le sujet soit euphonique (11 sujets) ou dysphonique (11 patients).

Une étude complémentaire a été menée sur la production des constrictives /z/, /ʁ/ et /ʒ/ qui sont aussi utilisées en rééducation vocale. On retrouve un comportement en débit similaire à celui de l'usage de la paille de 5mm de diamètre, avec un débit qui ne varie pas selon le type de constriction et qui se maintient dans un enchaînement [constrictive – voyelle].

En complément de l'analyse aérodynamique, les gestes phonatoires et articulatoires ont été examinés par nasofibroscopie et radioscopie pour les sons produits à la paille et pour les constrictives. Ils illustrent l'expansion des cavités supra-glottiques pendant la phonation à la paille, l'élévation laryngée avec l'élévation de hauteur tonale, et l'accentuation de la constriction glottique avec une augmentation de résistance (paille de diamètre fin). Ces travaux de thèse illustrent également l'implication en adduction des plis vocaux lors de la pratique d'instruments à vent.

Publications et communications associées :

- Benoît Amy de la Bretèque (2014) L'aérodynamique de la voix, à propos des exercices de rééducation avec constriction du tractus vocal, Thèse de Doctorat de l'Université Aix-Marseille

6.6 Coordination-synchronisation gestes-voix dans la maladie d'Alzheimer

La maladie d'Alzheimer (MA) est une affection neurodégénérative du système nerveux central qui conduit à une détérioration progressive et durable des fonctions cognitives du patient. Si elle affecte de façon évidente les capacités mnésiques du patient, cette maladie impacte également ses capacités de communication (Rousseau, 2011). De nombreux auteurs ont souligné le caractère multimodal de la communication parlée (e.g. McNeill, 2000 ; Kendon, 2004 ; Colletta et Guidetti, 2012). Les détériorations communicatives dans la MA rentrent dans ce cadre, les patients présentant des troubles dans la production de la parole (Barkat-Defradas et al., 2008 ; Rousseau, 2011 ; Cera et al., 2013) et des troubles dans la production des gestes (Glosser et al., 1998 ; Derouesné et al., 2000 ; Parakh et al., 2004 ; Carlomagno et al., 2005). Les apraxies manuelles pourraient même constituer un signe précoce de cette maladie (Schwartz et al., 2000 ; Crutch et al., 2007).

Rares sont les études qui ont étudiées conjointement les troubles de la parole et des gestes

manuels dans la maladie d'Alzheimer. Il en résulte que, si les procédures actuelles d'évaluation clinique des capacités de communication des patients atteints de la maladie d'Alzheimer prennent en compte l'aspect multimodal de la communication humaine, et en particulier les actes non verbaux, ils n'explorent pas l'altération éventuelle de la coordination et de la synchronisation entre parole et gestes manuels. C'est donc cet aspect qui est l'objet des travaux de thèse de doctorat de Diane Caussade : évaluer la dégradation de la communication orale et gestuelle chez des patients atteints de la MA, et plus particulièrement la relation entre leur production de voix parlée ou chantée et leur gestualité manuelle. L'intégration de la modalité chantée dans un protocole d'étude de la relation temporelle geste-parole est motivée par l'essor du mouvement actuel "Singing for the Brain" qui propose aux patients atteints de la MA des activités chantées permettant de stimuler leurs capacités de communication avec autrui (Bannan et Montgomery-Smith, 2008). L'étude de la production des gestes en parole et en chant permet de déterminer quels types de gestes sont produits selon la modalité et l'influence de la voix chantée sur le lien temporel entre geste et parole chez les personnes atteintes de la MA.

Une étude pilote portant sur une patiente atteinte de la MA et un sujet contrôle a permis de tester la faisabilité d'un protocole d'évaluation des capacités vocales, verbales et praxiques (Caussade, 2013 ; Caussade et al., 2013, 2014). Cette première étude a confirmé que les capacités communicatives de la patiente sont affectées dans leur multimodalité. Si une tendance à la dégradation du mouvement et de la configuration des gestes manuels est observée chez la patiente, ainsi qu'une désynchronisation entre les modalités, les gestes à valeur déictique sont mieux préservés. L'expression vocale chantée semble aider à la production de gestes communicatifs chez les deux participantes. Les capacités de rappel mnésique immédiat dans les deux modalités sont également améliorées en voix chantée par rapport à la voix parlée.

A la suite de cette étude pilote, le protocole d'évaluation a été amélioré, et complété par une batterie de tests orthophoniques : évaluation de l'aphasie (MT86 - d'après Joannette et al., 1998), de la motricité bucco-linguo-faciale (MBLF - d'après Gatignol et Lannadère, 2010), des praxies manuelles (Mahieux-Laurent et al., 2009). Ces tests ont été proposés dans le cadre d'un mémoire d'orthophonie étudiant plus spécifiquement la qualité vocale, la qualité de parole et la qualité des gestes manuels chez les patients atteints de la MA (Gaubert et Sérieux, 2015). Une base de données audio-visuelles a été enregistrée pour 4 patientes et 4 sujets contrôle. L'analyse des vidéos a souligné les difficultés rencontrées par les patientes MA dans le contrôle du mouvement, de la configuration et de l'orientation de leurs gestes manuels, sans qu'il y ait de différence notable entre les tâches en voix parlée et en voix chantée (Caussade et al., 2015). Les patientes ont présenté plus d'erreurs en parole que les sujets contrôle. Ces erreurs étaient plus fréquentes dans les tâches du protocole qui imposaient la production de gestes manuels en lien avec la parole ou le chant.

Publications et communications associées :

- Caussade D. (2013) Mise en place et évaluation d'un protocole expérimental en voix parlée et chantée pour l'étude de la coordination/synchronisation gestes-voix dans la démence de type Alzheimer. Mémoire de M2R U3 UFR LLASIC SFFLE
- Caussade D., Colletta J-M., Henrich N., Vallée N. (2013) Coordination/synchronisation gestes-voix dans la démence de type Alzheimer : un protocole expérimental original utilisant la parole et le chant, 51èmes Journées de Phonétique Clinique JPhC5, Liège, Belgique
- Caussade D., Vallée N., Henrich Bernardoni N., Colletta J-M. (2014) Coordination/synchronisation gestes-voix dans la démence de la maladie d'Alzheimer en voix parlée et chantée : une étude de cas, XXXièmes Journées d'Etudes sur la Parole, Le Mans, Juin 2014.

- Gaubert F., Serieux M. (2015) Etude de la voix, de la parole et de l'exécution conjointe de gestes manuels chez des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer. Mémoire d'Orthophonie, Université Claude Bernard Lyon1 - ISTR - Orthophonie.
- Caussade D., Gaubert F., Serieux M., Henrich Bernardoni N., Vallée N., Colletta J-M. (2015) Apraxies manuelles et de la parole en voix parlée et voix chantée chez les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer. Journées de Phonétique Clinique, Montpellier, 2015.
- Caussade D., Gaubert F., Serieux M., Henrich Bernardoni N., Colletta J-M., Vallée N. (2015) Hand gestures and speech impairments in spoken and sung modalities in people with Alzheimer's disease. Dans *Gesture and Speech in Interaction*, Gaëlle F. et Mark T. (eds.), Sep 2015, Nantes, France. 2015

Programme de recherche et perspectives

La voix humaine n'a pas fini de nous dévoiler ses mystères, et les vocalistes que nous sommes n'ont pas fini d'explorer les possibles de notre instrument ! Mes recherches à venir s'inscrivent dans cette passion toujours renouvelée de l'observation et de la modélisation du comportement vocal humain, avec une ouverture esquissée ces dernières années sur les usages thérapeutiques, artistiques et éducatifs de la voix humaine. Elles s'articulent de la façon suivante :

1. La voix humaine, les principes fondamentaux (analyse, synthèse, modélisation)
2. Techniques et usages de la voix chantée
3. Troubles et rééducation de la voix, de la parole et du chant

1 Voix et parole : anatomie et physiologie, gestes phonatoires et contrôle articulatoire, coordination pneumo-phono-résonantielle

1.1 Effort et coordination dans la production des consonnes occlusives

[ANR JC StopNCo 2015-2018, porté par M. Garnier]

L'objectif de ce projet est d'étudier les contraintes de coordination entre phonation et articulation dans la production des consonnes occlusives, et les efforts phonatoires et articulatoires mis en jeu. Ce projet s'appuie sur le développement de nouvelles méthodes exploratoires et l'élaboration de critères pour objectiver les ajustements laryngés et les efforts vocaux dans la production des consonnes occlusives. Nous nous intéresserons en particulier aux transitions de voisement. L'étude sera menée sur des populations vocalement saines, mais également sur des patients dysphoniques.

1.2 Description et compréhension des gestes phonatoires dans la production des plosives finales non-relâchées du vietnamien

[coll. int. T.T.H. Tran, N. Vallée]

Ce projet s'intéresse également à la production de consonnes occlusives, mais dans un cadre linguistique. Il s'agira de décrire et modéliser la production des plosives finales non-relâchées dans le Vietnamien. Ce projet fait suite aux travaux de thèse de T.T.H. Tran portant sur les processus d'acquisition des clusters et autres séquences de consonnes en langue seconde : de l'analyse acoustico-perceptive des séquences consonantiques du vietnamien à l'analyse de la perception et production des clusters du français par des apprenants vietnamiens du FLE.

1.3 Modélisation aéro-acoustique et biomécanique de la vibration des plis vocaux dans la production des voyelles

Ces recherches se déclineront sur les grands axes suivants :

- développement et amélioration du banc larynx hybride [coll. int. X. Laval, Ph. Chaffanjon ; coll. ext. T. Legou, A. Giovanni, A. Lagier]
- caractérisation vibro-mécanique des plis vocaux [coll. ext. L. Bailly, F. Silva]
- contrôle de l'expressivité vocale sur pièce anatomique [coll. ext. T. Hélie, L. Bailly, F. Silva, T. Legou, A. Lagier]

Le banc larynx hybride développé au Laboratoire d'Anatomie des Alpes Françaises, en étroite collaboration avec le Laboratoire d'Anatomie du CHU La Timone à Marseille, sera automatisé pour permettre une maîtrise fine et précise du contrôle mécanique de l'adduction des plis vocaux et de leur élongation, ainsi que du contrôle aérodynamique en pression. Nous étudierons la faisabilité des mesures de réponse mécanique par vibrométrie laser sur pièces anatomiques, dans la continuité du projet ANR VOFOCAM (F. Silva) et avec l'aide technique de l'ingénieur X. Laval de GIPSA-lab. Nous nous intéresserons ensuite à la conception de voix expressives en contextes artificiels et ex vivo pour la créativité musicale et les soins médicaux (projet ANR COREVOICE porté par T. Hélie).

2 La voix chantée

2.1 Pratiques vocales chantées : Human Beatbox, yodel, höömij, voix mixte

[coll. int. C. Savariaux, T. Hueber, M. Garnier, J. Meyer ; coll. ext. M. Castellengo]

Les travaux initiés sur les pratiques vocales à travers le monde seront poursuivis. Nous continuerons à porter notre attention sur l'art vocal émergent que constitue la pratique du Human Beatbox, une pratique vocale qui requiert une grande habileté dans la coordination entre gestes phonatoires et gestes articulatoires. Nous finaliserons des travaux initiés en Australie sur le yodel pour mettre en évidence les liens forts entre les voyelles choisies et les propriétés vibratoires glottiques dans les mécanismes laryngés M1 et M2. Nous poursuivrons une étude exploratoire sur la pratique du chant diphonique, en particulier la technique du höömij mongol. Nous aboutirons l'étude du registre de voix mixte utilisé dans l'art lyrique.

2.2 La voix chantée de l'enfant : mécanismes laryngés, ajustements résonantiels

[coll. ext. B. Roubeau, R. Expert]

Nous nous sommes intéressés aux mécanismes laryngés chez l'enfant pré-pubère. Nous compléterons cette étude par une exploration des ajustements résonantiels chez l'enfant, pour mettre en évidence les liens possibles entre phonation et articulation dans la voix chantée de l'enfant.

2.3 Du geste au chant et chant en chœur : l'interaction entre chef de chœur et choristes

[coll. int. M. Garnier, A. Remacle ; coll. ext. IFAC (Institut Français d'Art Choral), UFR Musicologie de l'UGA (Y. Rassendren) et Laboratoire Structure formelle du langage (C. Vincent,

D. Boutet, M. Blondel)]

Il s'agit d'un projet en phase de maturation qui répond à une demande de l'Institut Français d'Art Choral. Le chant choral est la discipline artistique la plus pratiquée au monde, avec plusieurs dizaine de millions de choristes amateurs. Il y a en particulier un besoin fort de mieux comprendre les interactions entre le chef de chœur et ses choristes, pour permettre un meilleur apprentissage de la pratique, et améliorer les procédures d'évaluation dans les cycles de formation à la direction de chœur. Lors des réunions préparatoires, plusieurs thèmes ont émergés, qui forment l'ossature du projet :

1. Le chœur dans l'espace acoustique et ses interactions : explorer les liens entre le chœur et l'acoustique de la salle (disposition du chœur dans l'espace), les interactions au sein du chœur entre choristes (positionnement, écoute de soi et des autres)
2. La justesse du chœur : explorer la justesse d'un chœur en rapport avec la hauteur des notes chantées, le timbre vocalique, l'intensité
3. Mimétisme et convergence dans la relation entre le chef de chœur et le chœur : explorer la question du rapport entre le visuel du chef et le son du chœur, les phénomènes d'imitation et de convergence entre gestes respiratoires, gestes manuels, et gestes oro-faciaux.

3 Troubles de la voix, de la parole et du langage

3.1 Voix, gestes, parole et chant dans la maladie d'Alzheimer

[partenaires : CM2R Arc-Alpin, CHU de Grenoble, Lidilem) projet en cours financé [N. Vallée et D. Caussade, J.-M. Colletta (Lidilem), O ; Moreaud & L. Cohen (CHU de Grenoble, CM2R & LPNC)] et ANR 2016 envisagée avec d'autres partenaires nationaux]

Ce projet déjà mentionné précédemment s'inscrit dans le cadre de la thèse de Diane Caussade. Il sera poursuivi par l'évaluation de l'impact d'une pratique vocale chantée régulière sur les capacités de communication des patients atteints de la maladie d'Alzheimer à travers la mise en place d'ateliers en voix parlée ou chantée.

3.2 Rééducation du bégaiement par la voix chantée : corrélats physiologiques et cognitifs

[coll. ext. S. Brignone, M. Verdurant, Y. Lévêque ; coll. int. N. Vallée]

Ce projet est en phase de maturation avec l'orthophoniste Sylvie Brignone. Il vise à mieux comprendre les observations empiriques de réussite des techniques de rééducation vocale des troubles du bégaiement par la voix chantée.

3.3 Rééducation vocale à la paille : principe physiologique et application à l'évaluation de la pression sous-glottique

[coll. ext. B. Amy de la Bretèque, A. Giovanni, T. Legou]

Ce projet s'inscrit dans la suite des travaux de thèse de Benoît Amy de la Bretèque portant sur la technique de rééducation vocale à la paille. Nous finaliserons l'exploration des principes physiologiques sous-jacents à la technique. Comme les précédents travaux ont montré la constance

de la différence entre pression sous-glottique et pression intra-orale quel que soit le diamètre de la paille utilisée, nous nous intéresserons à explorer la faisabilité d'une estimation de la pression sous-glottique à partir de la mesure de pression intra-orale pour des pailles de divers diamètres.

3.4 Elaboration de substituts fibreux d'oscillateurs biologiques, avec application aux plis vocaux

[coll. ext L. Bailly, L. Orgéas ; coll. int P. Chaffanjon]

Ce projet a été initié en 2014, et il a fait l'objet de plusieurs dépôts à des appels d'offre pour une bourse de thèse de doctorat (thèse Thibaud Cochereau, financée par le labex TEC21) et du financement de missions et d'équipements (Grenoble AGIR PEPS 2015). Il vise à l'élaboration, la caractérisation et l'implantation laryngée de plis vocaux artificiels, à partir d'une approche biomimétique des tissus humains. Les différentes étapes de ce projet sont :

1. l'élaboration de membranes composites fibreuses et le test de leurs propriétés mécaniques ;
2. l'étude de leurs propriétés viscoélastiques et vibratoires par analyse mécanique dynamique et par analyse modale ;
3. la substitution à des plis vocaux réels sur pièce anatomique et le test des conditions d'auto-oscillation de ces nouveaux matériaux

3.5 Étude clinique de l'impact de chirurgie endocrinienne cervicale (thyroïdectomie, parathyroïdectomie)

[coll. int Ph. Chaffanjon, coll. ext. S Guigard]

Ce projet s'inscrit dans la continuité du projet clinique ThyroVoice initié en 2010, qui vise à établir la morbidité vocale des chirurgies endocriniennes cervicales et à proposer un protocole d'évaluation vocale adapté au risque de ces chirurgies pour la voix parlée et la voix chantée qui puisse être à terme inclus dans les soins proposés au patient au cours des phases pré- et post-opératoires. A la suite des travaux précédemment menés, le protocole d'évaluation des capacités vocales parlées et chantées sera repensé, pour être plus ciblé sur les difficultés phonatoires et articulatoires post-opératoires mises en évidence pour ce type de chirurgie. Il sera également simplifié pour une prise en charge systématique dans le cadre des soins. L'étude sera déployée sur plusieurs centres hospitaliers ayant une activité forte dans le domaine des chirurgies endocriniennes cervicales.

3.6 Troubles de la voix chantée : physiologie et rééducation

[coll. ext. B. Amy de la Bretèque, C. Pillot, T. Legou]

Ce projet répond à la demande d'une orthophoniste ayant effectué un master de Sciences du Langage, Marion Beaud. Elle souhaite poursuivre en thèse, en parallèle de son activité clinique, sur la question de la dysodie dysfonctionnelle qui est un trouble de la voix chantée. Ce projet vise à explorer les déséquilibres entre les fonctions respiratoires, les gestes phonatoires et les gestes articulatoires à l'origine de ces troubles de la voix chantée. Il se décline sur trois axes :

1. Décrire les mécanismes dysfonctionnels chez les sujets dysodiques selon le style de chant, la tessiture, le niveau d'entraînement et le profil vocal

2. Etudier la résistance laryngée et sa gestion dans le chant chez ces chanteurs, comparative-ment à une population ne présentant pas de dysodie
3. Explorer l'effet de différentes prises en charge orthophoniques (telles que la phonation dans un tube, ou les thérapies manuelles) sur les dysfonctionnements en voix chantée, et en particulier sur la résistance laryngée

Bibliographie

- Amy de La Bretèque B. (2000) A l'origine du son, le souffle : le travail de la respiration pour la voix et pour l'instrument à vent. Coll. Solal, Ed. de Boeck.
- Amy de La Bretèque B. (2004) L'équilibre et le rayonnement de la voix. Coll. Solal, Ed. de Boeck.
- Amy de la Bretèque B. (2014) L'aérodynamique de la voix : à propos des exercices de rééducation avec constriction du tractus vocal. Thèse de doctorat en Sciences du langage, Université de Provence.
- Bailly L., Pelorson X., Henrich N., Ruty N. (2008) Influence of a constriction in the near field of the vocal folds : Physical modeling and experimental validation, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 124 (5), pp. 3296-3308.
- Bailly L. (2009) Interaction entre cordes vocales et bandes ventriculaires en phonation : exploration in-vivo, modélisation physique, validation in-vitro. Thèse de doctorat en Acoustique de l'Université du Maine.
- Bailly L., Henrich N., Pelorson X. (2010) Vocal fold and ventricular fold vibration in period-doubling phonation : Physiological description and aerodynamic modeling, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 127(5), pp. 3212-3222.
- Bailly L., Henrich Bernardoni N., Müller F., Rohlf A-K., Hess M. (2014) The ventricular-fold dynamics in human phonation. J Speech Lang Hear Res, vol.57, pp. 1219-1242.
- Bannan N., Montgomery-Smith C. (2008) *Singing for the Brain* : reflections on the human capacity for music arising from a pilot study of group singing with Alzheimer's patients. The journal of the Royal Society for the Promotion of Health, 128(2), pp. 73-78.
- Barkat-Defradas M., Martin S., Duarte L. R., Brouillet D. (2008) Les troubles de la parole dans la maladie d'Alzheimer. 27e journée des JEP, Avignon.
- Barney A., De Stefano A. and Henrich N. (2007) The effect of glottal opening on the acoustic response of the vocal tract, Acta Acustica united with Acustica, vol. 93 (6), pp. 1046-1056.
- Behnke E. (1880) The mechanism of the human voice, 12 ed. London : J. Curwen and Sons, Warwick Lane, E.C.
- Boersma P., Kovacic G. (2006) Spectral characteristics of three styles of Croatian folk singing, Journal of the Acoustical Society of America, 119(3), pp. 1805-1816.
- Bourdin D., and Navion A., (2013) Mesure de l'efficacité vocale au sien d'une population de chanteurs de humain beatbox : Analyse acoustique, aérodynamique et observation comportementale, Mémoire d'Orthophonie, Université Claude Bernard Lyon1 - ISTR - Orthophonie.
- Bourne T., Garnier M. (2012) Physiological and acoustic characteristics of the female music theatre voice, J. Acoust. Soc. Amer., 131 (2), pp. 1586-1594.

- Brotons M., Koger S. M. (2000) The impact of music therapy on language functioning in dementia. *Journal of music therapy*, 37(3), pp. 183-195.
- Carlomagno S., Pandolfi M., Marini A., Di Iasi G., Cristilli C. (2005) Coverbal gestures in Alzheimer's type dementia. *Cortex*, 41(4), pp. 535-546.
- Castellengo M., Chuberre B., Henrich N. (2004) Is voix mixte, the vocal technique used to smoothe the transition across the two main laryngeal mechanisms, an independent mechanism ?, ISMA, Nara, Japan, April. 2004.
- Castellengo M. (2005) Manuel Garcia Jr : A Clear-Sighted Observer of Human Voice Production, *Logopedics Phoniatics Vocology* 30 (3-4), pp. 163-70.
- Castellengo M., Lamesch S., Henrich N. (2007) Vocal Registers and Laryngeal Mechanisms, a case study : The French "Voix Mixte" », 19th International Congress on Acoustics, Madrid, Spain, Sept. 2007.
- Childers D. G., Wong C. F. (1994) Measuring and modeling vocal source-tract interaction., *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 41(7), pp. 663-671.
- Clouet A., de Torcy T. (2010) Le Human beatbox : Etudes qualitatives acoustique en video-fibronasoscopie. Mémoire d'orthophonie, Université Paris 6.
- Colletta J-M., Guidetti M. (2012) *Gesture and Multimodal Development*. Benjamins Current Topics series, Amsterdam.
- Cook P. R. (1991) Identification of Control Parameters in an Articulatory Vocal Tract Model, with Applications to the Synthesis of Singing. PhD thesis, Stanford University.
- Corballis M.C. (2003) From mouth to hand : Gesture, speech, and the evolution of right-handedness. In *Behavioral and Brain Sciences* (26), 199-260.
- Crutch S. J., Rossor M. N., Warrington E. K. (2007) The quantitative assessment of apraxic deficits in Alzheimer's disease. *Cortex*, 43(7), pp. 976-986.
- d'Alessandro C., Tzoukermann E. (2001) Synthèse de la parole à partir du texte. *Traitement Automatique des Langues*, Hermès, Vol. 42 No 1, 333 pages + disque compact audio de 62 mn.
- Debruyne F., Ostyn F., Delaere P., Wellens W. (1997) Acoustic analysis of the speaking voice after thyroidectomy, *J Voice* 11(4), pp. 479-482.
- Derouesné C., Lagha-Pierucci S., Thibault S., Baudouin-Madec V., Lacomblez L. (2000) Apraxic disturbances in patients with mild to moderate Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, 38(13), pp. 1760-1769.
- De Torcy T., Clouet A., Pilot-Loiseau C., Vaissière J., Brasnu D., Crevier-Buchman L. (2014) A video-fiberscopic study of laryngopharyngeal behaviour in the human beatbox. *Logopedics Phoniatics Vocology*, 39(1), pp. 38-48.
- Doval B., d'Alessandro C., Henrich N. (2006) The spectrum of glottal flow models, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 92, pp. 1026-1046.
- Dowd A., Smith J.R., Wolfe J. (1998) Learning to pronounce vowel sounds in a foreign language using acoustic measurements of the vocal tract as feedback in real time, *Language and Speech*, 41, pp. 1-20.
- Dutoit T. (1997) *An introduction to text-to-speech synthesis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Epps J., Smith J.R., Wolfe J. (1997) A novel instrument to measure acoustic resonances of the vocal tract during speech, *Measurement Science and Technology* 8, pp. 1112-1121.

-
- Fant G. (1960) Acoustic theory of speech production. Mouton, La Hague.
- Fant G. (1993) Some problems in voice source analysis, *Speech Communication* vol. 13, pp. 7-22
- Farina A. (2000) Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In *Audio Engineering Society Convention 108*. Audio Engineering Society.
- Fauth C. (2012) Perturbation de la production de la parole suite à une opération de la glande thyroïde. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, Strasbourg.
- Fujimura O., Lindqvist J. (1971) Sweep-tone measurements of vocal-tract characteristics, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 49, pp. 541-558.
- Garcia M. (1847) *Mémoire sur la voix humaine* présenté à l'Académie des Sciences en 1840, 2nd ed. Imprimerie d'E. Duverger, Paris.
- Garcia M. (1884) *Traité complet de l'Art du Chant*, 8th ed. Heugel et Cie, Paris.
- Garnier M. (2007) Communiquer en environnement bruyant : de l'adaptation jusqu'au forçage vocal. Thèse de Doctorat en Acoustique-Phonétique, Université Paris 6.
- Garnier M., Henrich N., Smith J., Wolfe J. (2010a) Vocal tract adjustments in the high soprano range, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 127 (6), pp. 3771–3780.
- Garnier M., Henrich N., Dubois D. (2010b) Influence of sound immersion and communicative interaction on the Lombard effect, *Journal of Speech, Language and Hearing Research* 53(3), pp. 588-608.
- Garnier M., Henrich N. (2014) Speaking in noise : How does the Lombard effect improve acoustic contrasts between speech and ambient noise? *Comput. Speech Lang.* vol. 28, pp. 580-597.
- Gatignol P., Lannadère E. (2010) MBLF : Bilan informatisé de la Motricité Bucco-linguo-Faciale (version adulte). Chateauroux : Edition Adeprio.
- Glosser G., Wiley M. J., Barnoskir E. J. (1998) Gestural communication in Alzheimer's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 20(1), pp. 1-13.
- Hanna N. (2014) Investigations of the acoustics of the vocal tract and vocal folds in vivo, ex vivo and in vitro, Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble et de l'UNSW, Sydney.
- Hatzikirou H., Fitch W.T., Herzel H. (2006) Voice instabilities due to source-tract interactions. *Acta Acoust United With Acoust Vol.92* : pp. 468-75.
- Henrich N. (2001), Etude de la source glottique en voix parlée et chantée : modélisation et estimation, mesures acoustiques et électroglottographiques, perception, Thèse de doctorat de l'Université Paris 6.
- Henrich N., d'Alessandro C., Doval B. (2001) Spectral correlates of voice open quotient and glottal flow asymmetry : theory, limits and experimental data *EUROSPEECH 2001*, Aalborg, Denmark, Sept. 2001.
- Henrich N. , d'Alessandro C. , Castellengo M. and Doval B. (2004) On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of nonpathological phonation, *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 115 (3), pp. 1321-1332.
- Henrich N., d'Alessandro C., Castellengo M., Doval B. (2005) Glottal open quotient in singing : Measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity, and fundamental frequency, *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 117 (3), pp. 1417-1430.

- Henrich N., Kiek M., Smith J., Wolfe J. (2007) Resonance strategies used in Bulgarian women's singing style : a pilot study. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, vol. 32 :4, pp. 171-177.
- Henrich N., Smith J., Wolfe J. (2011a) Vocal tract resonances in singing : Strategies used by sopranos, altos, tenors, and baritones. *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 129 (2), pp. 1024-1035.
- Henrich N. (2012) *Physiologie de la voix chantée : vibrations laryngées et adaptations phono-résonantielles*, Entretiens de Médecine Physique et de réadaptation, Montpellier Mars 2012.
- Henrich N. (2014) Vibrations et résonances en voix chantée, dans "La voix chantée, entre sciences et pratiques", Ed. De Boeck, Coll. Voix parole langage (Solal), pp. 3-20.
- Herbst C.T., Lohscheller J., Švec J.G., Henrich N., Weissengruber G., Fitch W.T. (2014) Glottal opening and closing events investigated by electroglottography and super-high-speed video recordings. *J Exp Biol.* vol 15, pp. 955-963.
- Hirano M., Vennard W., Ohala J. (1970) Regulation of register, pitch and intensity of voice. *Folia Phoniatr.* vol. 22, pp.1-20.
- Hirano M. (1982) The role of the layer structure of the vocal fold in register control. *Vox Humana*, University of Jyvaskyla pp. 50-62.
- Hirano M. (1988) Vocal mechanisms in singing : laryngological and phoniatric aspects. *Journal of Voice* Vol.2(1), pp. 51-69.
- Hollien H. (1974) On vocal registers. *Journal of Phonetics* vol.2, pp.125-143.
- Hollien H. (1983) Report on vocal registers. In : Askenfelt A, Felicetti S, Jansson E, Sundberg J, editors. *Stockholm Musical Acoustic Conference (SMAC)*, Stockholm, Sweden : Royal Swedish Academy of Music No. 46 :1, pp. 27-35.
- INSERM expertise collective (2007) *La voix : ses troubles chez les enseignants*. Les éditions Inserm.
- Ishizaka K., Flanagan J.L. (1972) Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of vocal folds. *The Bell System Technical Journal*, 51(6) : pp. 1233-1267.
- Joanette Y., Nespoulous J-L., Roch Lecours A. (1998) MT 86 – Protocole Montréal-Toulouse d'examen linguistique de l'aphasie. Ortho Edition, Paris.
- Joliveau E., Smith J., Wolfe J. (2004a) Tuning of vocal tract resonance by sopranos, *Nature* 427, pp. 116.
- Joliveau E., Smith J., Wolfe J. (2004b) Vocal tract resonances in singing : The soprano voice, *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 116 (4), pp. 2434-2439.
- Junqua J. (1993) The Lombard reflex and its role on human listener and automatic speech recognizers. *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol.93, pp. 510-524.
- Karakozoglou S-Z. (2010) *Analyse de la source glottique : une étude combinatoire par vidéoendoscopie ultra-rapide et électroglottographie [Glottal source analysis : a combinatory study using high-speed videoendoscopy and electroglottography]*, Rapport de stage de Master M2 Recherche Informatique, Université Paris-Sud, Université de Crète.
- Kendon A. (2004) *Gesture : Visible Action as Utterance*. Cambridge University Press, NY.
- Klatt D.H. (1980) Software for a cascade/parallel formant synthesizer, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 67, pp. 979-995.

-
- Klatt D., Klatt L. (1990) Analysis, synthesis, and perception of voice quality variations among female and male talkers, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 87(2), pp. 820-857.
- Kim Y. E. (2003) Singing voice analysis/synthesis, PhD thesis MIT.
- Lamesch S., Expert R., Castellengo M., Henrich N., Chuberre B. (2007) Investigating voix mixte : A scientific challenge towards a renewed vocal pedagogy, 3rd Conference on Interdisciplinary Musicology, Tallinn, Estonia, Aug. 2007.
- Laukkanen A-M., Titze I.R., Hoffman H., Finnegan E.M. (2008) Effects of a semi-occluded vocal tract on laryngeal muscle activity and glottal adduction in a single female subject, *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 60 (6), pp. 298–311
- Laukkanen A-M., Horacek J., Krupa P., Svec J. G. (2012) The effect of phonation into a straw on the vocal tract adjustments and formant frequencies. A preliminary MRI study on a single subject completed with acoustic results, *Biomedical Signal Processing and Control*, V. 7, Issue 1, January 2012, pp. 50–57
- Lederer K. (2005) The phonetics of beatboxing, BA dissertation, Leeds University, UK.
- Lee S., Potamianos A., Narayanan S. (1999) Acoustics of children’s speech : Developmental changes of temporal and spectral parameters, *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol.105(3), pp. 1455-1468.
- Lombard E. (1911) Le signe de l’élévation de la voix, *Ann.Mar. Oreil. Larynx* 37, pp. 101–119.
- Lu H-L. (2002) Toward a High-Quality Singing Synthesizer with Vocal Texture Control. PhD thesis, Stanford University.
- Lucero J.C., Lourenço K.G., Hermant N., Van Hirtum A., Pelorson X. (2012) Effect of source–tract acoustical coupling on the oscillation onset of the vocal folds, *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 132 (1), pp. 403-411.
- Mahieux-Laurent F., Fabre C., Galbrun E., Dubrulle A., Moroni C., Groupe de réflexion sur les praxies du CMRR Ile-de-France Sud (2009) Validation d’une batterie brève d’évaluation des praxies gestuelles pour consultation Mémoire. Evaluation chez 419 témoins, 127 patients atteints de troubles cognitifs légers et 320 patients atteints d’une démence. *Revue Neurologique*, 165(6), pp. 560-567.
- Makhoul J. (1975) Linear prediction : A tutorial review. *Proc. IEEE*. pp. 561-580.
- Markel J.D., Gray A.H. (1976) Linear prediction of speech, Springer-Verlag, Berlin.
- Martino R. (2009) Le Human Beatbox et ses participants. Mémoire de Master 2, Université Pierre-Mendès-France, Grenoble, France.
- McNeill D. (2000) Language and gesture. Cambridge University Press, Cambridge.
- Meek P., Carding P. N., Howard D. H., Lennard T. W. J. (2008) Voice change following thyroid and parathyroid surgery, *J Voice* 22(6), pp. 765-772.
- Messner G.F. (1980) Die Schwebungsdiaphonie in Bistrica. Eine Untersuchung der ehrstimmigen Liedformen eines mittelwestbulgarischen Dorfes. In : *Wiener Veröffentlichungen zur Musikwissenschaft*, vol. 12. Tutzing, Germany : Hans Schneider Publisher.
- Miller D.G. (2000) Registers in singing : empirical and systematic studies in the theory of the singing voice. Groningen : University of Groningen.
- Mörner M., Fransson F., Fant G. (1963) Voice register terminology and standard pitch. *STL-QPSR.*, pp. 17-23.

- Noll A.M. (1964) Short-time spectrum and "cepstrum" techniques for vocal pitch detection, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 36, pp. 296-302.
- Ojamaa T., Ross J. (2009) Sound and timing must be perfect. Production aspects of the human beatboxing, *Proceedings of the Fifth Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM09)*.
- Parakh R., Roy E., Koo E., Black S. (2004) Pantomime and imitation of limb gestures in relation to the severity of Alzheimer's disease. *Brain and cognition*, 55(2), pp. 272-274.
- Pelorson X., Hirschberg A., Van Hassel R.R., Wijnands A.P.J., Auregan Y. (1994) Theoretical and experimental study of quasisteady-flow separation within the glottis during phonation. Application to a modified two-mass model, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 96(6) : pp. 3416-3431.
- Pillot-Loiseau C., Quattrocchi S., Amy de La Bretèque B. (2009) Travail de la voix sur le souffle : rééducation à la paille, aspects scientifiques et rééducatifs méthode du Dr Benoît Amy de la Bretèque. *La voix dans tous ses maux*, pp. 243-249.
- Proctor M., Bresch E., Byrd D., Nayak K., Narayanan S. (2013) Paralinguistic mechanisms of production in human beatboxing : A real-time magnetic resonance imaging study, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 133 (2), pp. 1043 :1054.
- Renard R. (2002) Apprentissage d'une langue étrangère seconde. La phonétique verbotonale. Bruxelles : De Boeck Université.
- Rodet X. (1984) Time-domain formant-wave-function synthesis, *Computer Music Journal*, pp. 9-14.
- Roubeau B. (1993) Mécanismes vibratoires laryngés et contrôle neuro-musculaire de la fréquence fondamentale. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Orsay.
- Roubeau B., Castellengo M. (1993) Revision of the notion of voice register. In : XIXth International CoMeT Congress, Utrecht.
- Rousseau T. (2011) Maladie d'Alzheimer et troubles de la communication. Elsevier-Masson, Issy-les-Moulineaux.
- Ruty N. (2007). Modèles d'interactions fluide parois dans le conduit vocal. Applications aux voix et aux pathologies. Thèse de l'Institut Polytechnique de Grenoble, Spécialité Signal Image Parole Télécom.
- Sakakibara K-I. (2003) Production mechanism of voice quality in singing. *Journal of the Phonetic Society of Japan* vol.17(3), pp. 27-39.
- Schwartz R. L., Adair J. C., Raymer A. M., Williamson D. J., Crosson B., Rothi L. J., Nadeau S.E., Heilman K. M. (2000) Conceptual apraxia in probable Alzheimer's disease as demonstrated by the Florida Action Recall Test, *Journal of the International Neuropsychological Society*, 6(3), pp. 265-270.
- Stowell D., Plumbley M.D. (2008) Characteristics of the beatboxing vocal style, Technical Report, Department of Electronic Engineering, Queen Mary, University of London, Centre for DigitalMusic C4DMTR- 08-01
- Suares M., Cayrayre F., Ouaknine M., Amy de la Bretèque B., Giovanni A. (2004) Etude du comportement de la pression supra-glottique lors de la constriction partielle du tractus vocal. *Revue de laryngologie, d'otologie et de rhinologie*, 125(5), pp. 291-296.
- Sundberg J. (1975) Formant technique in a professional female singer, *Acustica* 32, pp. 89-96.

-
- Swerdlin Y., Smith J., Wolfe J. (2010) The effect of whisper and creak vocal mechanisms on vocal tract resonances, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 127(4), pp. 2590-2598.
- Svec J.G., Schutte H.K., Miller D.G. (1999) On pitch jumps between chest and falsetto registers in voice : Data from living and excised human larynges, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 106(3) : pp. 1523-1531.
- Tarneaud J., Borel-Maisonny S. (1961), *Traité pratique de phonologie et de phoniatrie, la voix - la parole - le chant*. Paris, Maloine, 2nde Ed.
- Titze I.R. (1992) Phonation threshold pressure : a missing link in glottal aerodynamics, *J. Acoust. Soc. Amer.* 91(5), pp. 2926-2935.
- Titze I.R. (1994) *Principles of Voice Production*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall.
- Titze I.R. and Story B.H. (1997) Acoustic interactions of the voice source with the lower vocal tract., *J. Acoust. Soc. Amer.*, 101 (4), pp. 2234-2243.
- Titze I.R. (2004a) A theoretical study of F0-F1 interaction with application to resonant speaking and singing voice., *J Voice*, vol. 18(3), pp. 292-298.
- Titze I.R. (2004b) Theory of Glottal Airflow and Source-Filter Interaction in Speaking and Singing, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 90, pp. 641-648.
- Titze I.R. (2006) Voice training and therapy with a semi-occluded vocal tract : rationale and scientific underpinnings, *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 49, pp. 448-459
- Titze I.R. (2008a) Nonlinear source-filter coupling in phonation : theory, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 123, pp. 2733-2749
- Titze I.R., Riede T., Popolo P. (2008b) Nonlinear source-filter coupling in phonation : vocal exercises, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 123(4), pp. 1902-1915.
- Van Lierde K., D'Haeseleer E., Wuyts F.L., Baudonck N., Bernaert L., Vermeersch H. (2010) Impact of thyroidectomy without laryngeal nerve injury on vocal quality characteristics : an objective multiparameter approach, *Laryngoscope* 120(2), pp. 338-345.
- Vampola T., Laukkanen A-M., Horacek J., Svec J.G. (2011) Vocal tract changes caused by phonation into a tube : a case study using computer tomography and finite element modeling, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 129 (1), pp. 310-315
- Van den Berg J.W., Vennard W., Burger D., Shervanian C.C. (1960) *Voice production : the vibrating larynx*. In : Instructional film. University of Groningen ed. The Netherlands.
- Van den Berg J.W. (1963) Vocal ligaments versus registers. *NATS Bulletin*. vol. 20, pp. 16-21.
- Vennard W.(1967) *Singing : the mechanism and the technic*. New York : Carl Fischer.
- Wolfe J., Smith J., Tann J., Fletcher N.H. (2001) Acoustic impedance of classical and modern flutes, *Journal of Sound and Vibration*, 243, pp. 127-144.